

# Umgang mit ausgehobenem Boden in Grossbaustellen

## bodenphysikalische Charakterisierung der Entwicklung unterschiedlich gelagerter und wieder ausgebrachter Böden

**Report****Author(s):**

Suter, Brigitte; Vogt, Lea

**Publication date:**

2005

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005094216>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

# Umgang mit ausgehobenem Boden in Grossbaustellen

Bodenphysikalische Charakterisierung der Entwicklung  
unterschiedlich gelagerter und wieder ausgebrachter Böden



Brigitte Suter und Lea Vogt

Vertiefungsblockarbeit am D-BAUG in Umweltingenieurwissenschaften  
ETH Zürich, Hönggerberg

Betreuung und Unterstützung:  
Bernhard Buchter, Beat Schäffer, Werner Attinger

Zürich, 21. Dezember 2005

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
2.1	Versuchsfläche . . . . .	2
2.2	Fragestellung . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
3.1	Korngrößenverteilung . . . . .	5
3.2	pH-Wert . . . . .	5
3.3	Organische Substanz . . . . .	5
3.4	Lagerungsdichte . . . . .	6
3.5	Porosität . . . . .	6
3.6	Vorbelastung . . . . .	8
3.7	Kompressionsbeiwert . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Methoden</b>	<b>10</b>
4.1	Probenahme . . . . .	10
4.2	Korngrößenverteilung . . . . .	11
4.3	pH-Wert . . . . .	11
4.4	Organische Substanz . . . . .	11
4.5	Lagerungsdichte . . . . .	11
4.6	Desorption . . . . .	12
4.7	Ödometrie . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Resultate</b>	<b>14</b>
5.1	Korngrößenverteilung . . . . .	14
5.2	pH-Wert . . . . .	15

---

5.3	Organische Substanz . . . . .	15
5.4	Lagerungsdichte . . . . .	16
5.5	Porenvolumina . . . . .	18
5.5.1	Feinporen - Plastikzylinder . . . . .	18
5.5.2	Mittelporen - Plastikzylinder . . . . .	19
5.5.3	Fein- und Mittelporen - Burgerzylinder . . . . .	19
5.5.4	Grobporen - Plastik- und Burgerzylinder . . . . .	20
5.5.5	Gesamtporen - Plastik- und Burgerzylinder . . . . .	20
5.6	Vorbelastung . . . . .	21
5.7	Kompressionsbeiwert . . . . .	22
5.8	Schwermetalle . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>24</b>
6.1	Beurteilung der Parameter . . . . .	25
6.1.1	Vorbelastung . . . . .	25
6.1.2	Grobporenvolumen . . . . .	25
6.1.3	Effektive Lagerungsdichte . . . . .	26
6.1.4	Kompressionsbeiwert . . . . .	26
6.1.5	Fazit . . . . .	27
6.2	Korrelationen mit der Vorbelastung und zeitliche Entwicklung der Parameter . . . . .	27
6.2.1	Einleitung . . . . .	27
6.2.2	pH . . . . .	27
6.2.3	Textur . . . . .	27
6.2.4	Porosität . . . . .	28
6.2.5	Lagerungsdichte . . . . .	29
6.2.6	Humusgehalt . . . . .	29
6.3	Korrelationen mit dem Kompressionsbeiwert . . . . .	29

<b>7 Vegetationsentwicklung</b>	<b>31</b>
7.1 Messungen . . . . .	31
7.2 Diskussion . . . . .	31
7.3 Zusammenfassung . . . . .	33
<b>8 Schlussfolgerungen</b>	<b>34</b>
<b>9 Ausblick</b>	<b>34</b>
<b>10 Literaturverzeichnis</b>	<b>35</b>
<b>11 Anhang</b>	<b>37</b>
11.1 Schwermetallanalyse . . . . .	37
11.2 Ödometerversuch - Verfahren nach Casagrande . . . . .	37
11.3 Methodenvergleich . . . . .	38
11.4 Porosität vs. Lagerungsdichte . . . . .	38
11.5 Daten . . . . .	39

**Vorwort**

Diese Arbeit ist im Rahmen des Vertiefungsblocks VTB der Umweltingenieurwissenschaften im Kreditfach Bodenschutz an der ETH Zürich entstanden.

An dieser Stelle möchten wir uns besonders bedanken bei

- Rainer Schulin, Professor für Bodenschutz, ITÖ ETH Zürich
- Bernhard Buchter, ITÖ ETH Zürich für die Betreuung und Organisation
- Beat Schäffer, ITÖ ETH Zürich für die Unterstützung in allen Bereichen
- Werner Attinger, ITÖ ETH Zürich für die Unterstützung im Labor und im Feld
- Anna Grünwald, ITÖ ETH Zürich für die Unterstützung im Labor
- Lisa Eggenschwiler, FAL Zürich für die Unterstützung vor Ort
- Hans Pfister, Basler & Hofmann für das Projekt
- François Schnider, FaBo Zürich
- Unique, Flughafen Zürich AG

Brigitte Suter und Lea Vogt

Zürich, 19. November 2005

## 1 Zusammenfassung

Boden wird auf Grossbaustellen oft zwischengelagert und später an einem anderen Ort rekultiviert. Für die Zwischenlagerdepots bestehen strenge gesetzliche Lagerungsvorschriften, die zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit der rekultivierten Fläche beitragen.

So dürfen Bodenzwischenlager beispielsweise nicht befahren und verdichtet werden und ihre Schütthöhe ist auf ein Maximum begrenzt. Im Rahmen der 5. Ausbaustappe des Flughafens Zürich wurden Bodenzwischenlager erstellt. Ein Depot wurde bodenschutzkonform angelegt, das andere wurde verdichtet. Im Jahr 2003 erfolgte das Anlegen einer Versuchsfläche auf dem Flughafengelände, mit Boden aus der anaeroben und Boden aus der aeroben Schicht je aus beiden Lagern. Ein Jahr darauf wurden im Rahmen eines Vertiefungsblocks der ETH bodenphysikalische Untersuchungen gemacht, die in diesem Jahr wiederholt wurden. Ebenfalls sind die Proben aus den Lagern analysiert worden. Parallel dazu wurde zweimal jährlich eine Vegetationsaufnahme durchgeführt. Ziele der vorliegenden Arbeit sind die Beschreibung der Entwicklung der Böden über die drei Jahre und die Qualität der Lager, sowie ein Vergleich der bodenphysikalischen Messungen mit der Vegetationsentwicklung.

Zusammenfassend weisen die Untersuchungen eine Verdichtung im beeinträchtigten Lager und eine bodenphysikalische Regeneration der Böden auf der Rekultivierungsfläche auf. Vorbelastung, Grobporenvolumen und teilweise auch die effektive Lagerungsdichte zeigen, als wichtige verdichtungsempfindliche Parameter, im 2003 Verdichtungsanzeichen im beeinträchtigten Lager, im 2004 geringe und im 2005, durch die natürliche Setzung bedingt, wieder etwas höhere Verdichtungen. Unter den Korrelationen der Parameter zur Vorbelastung scheinen die Grobporen ein gutes Mass für die Vorbelastung zu sein, während die effektive Lagerungsdichte eine exponentielle Abhängigkeit zur Vorbelastung zeigt.

Die Vegetation ist im 2003 auf Boden aus dem unverdichteten Lager sehr spärlich ausgefallen. Im 2004 ist die Vegetation bis auf einen Bodenstreifen gleich gut gewachsen. Im 2005 hat sich die Pflanzenbedeckung auf allen Böden ausgeglichen, die mittlere Pflanzenhöhe und die Biomasse erreichen jedoch höhere Werte auf dem unverdichteten Boden. Die verdichteten Lager scheinen Boden mit besseren Keimbedingungen zu liefern, jedoch mit ungünstigerer langfristiger Ertragsvoraussetzung. Bessere Keimbedingungen könnten mit einem effizienteren Wasserrückhaltevermögen durch die höhere Lagerungsdichte und mit mehr leichtverfügbaren Nährstoffen erklärt werden. Die langfristige Bodenfruchtbarkeit ist möglicherweise auf ein grösseres Nährstoffreservoir und ein günstigeres Gefüge des unverdichteten Bodens zurückzuführen. Die bodenphysikalischen Parameter haben sich angeglichen und dürften für die Vegetationsentwicklung kaum eine Rolle spielen. Bodenphysikalisch hat sich der im Lager verdichtete Boden erholen können, was nicht nur der natürlichen Regeneration, sondern auch der Lockerung durch die Schüttung zu verdanken ist. Unklar bleibt, ob das Ausgangsmaterial der Zwischenlager schon in den Gefügen unterschiedlich war und somit günstigere oder ungünstigere Voraussetzungen mitgebracht hat.

## 2 Einleitung

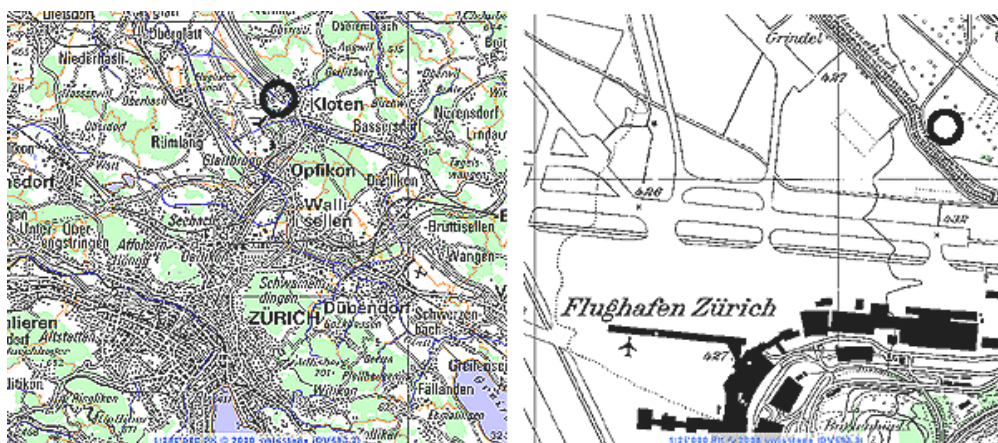
Auf Grossbaustellen werden oft grosse Mengen an Ober- und Unterbodenmaterial an einem Ort ausgehoben, zwischengelagert, später an einem neuen Ort wieder geschüttet und rekultiviert. Die Zwischenlagerdepots unterliegen strengen Bodenschutzkriterien. Die wichtigsten davon sind:

- Schütthöhe: Mit einer vorgeschriebenen Maximalschütthöhe soll man verhindern, dass das Bodenmaterial anaerob wird.
- Verdichtungsverbot: Die Zwischenlager müssen locker geschüttet werden und dürfen nicht mit Maschinen verdichtet werden.

Die vorliegende Arbeit untersucht, inwiefern die Qualität des Bodens durch Verdichtungen während der Zwischenlagerung beeinträchtigt wird, ob der Boden sich regenerieren kann und wie eine Verdichtung das Pflanzenwachstum beeinflusst.

### 2.1 Versuchsfläche

In Rahmen der 5. Bauetappe des Flughafens Zürich wurden grosse Mengen an Oberbodenmaterial abgetragen und verschoben. Dazu wurden zwei Drittel von diesem Oberboden vor Ort für eine spätere Rekultivierung zwischengelagert. Im Flughafengelände ergab sich, dank der Unterstützung der Unique, die Möglichkeit eine Versuchsfläche anzulegen. Abbildung 1 zeigt die geographische Lage dieser Versuchsfläche.

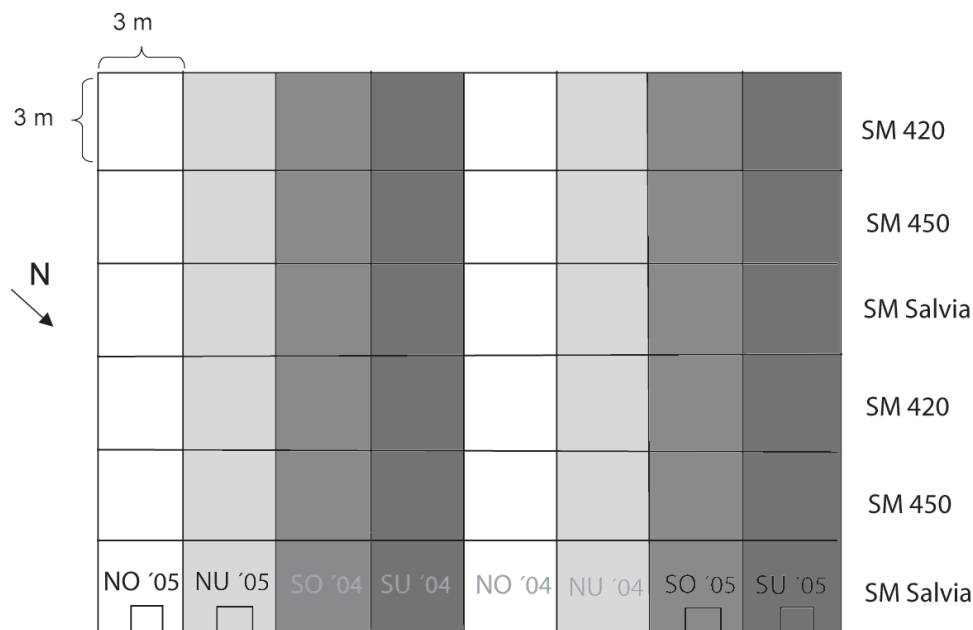


**Abbildung 1:** Lage der Versuchsfläche beim Flughafen Zürich.



Die Versuchsflächen wurden mit Bodenmaterial aus je zwei Tiefen von einem verdichteten und von einem locker geschütteten Zwischenlager angelegt. Das nördliche Lager wurde bodenschutzkonform behandelt, das südliche Lager wurde verdichtet, d.h. bei der Anlegung mit Fahrzeugen befahren. Quer zu diesen Bodenstreifen wurden drei Saatgutmischungen (SM 420, SM 450, SM Salvia) gesät. Abbildung 2 zeigt diese Versuchsanordnung. Die verschiedenen Oberbodenmaterialien werden in diesem Bericht wie folgt abgekürzt:

- Obere Schicht des Oberbodens des nördlichen Depots, unverdichtet (NO)
- Untere Schicht des Oberbodens des nördlichen Depots, unverdichtet (NU)
- Obere Schicht des Oberbodens des südlichen Depots, verdichtet (SU)
- Untere Schicht des Oberbodens des südlichen Depots, verdichtet (SO)



**Abbildung 2:** Anordnung der Versuchsfläche. Vertikal sind die verschiedenen Oberböden dargestellt, horizontal die Saatgutmischungen. Die unterste Zeile zeigt die Probenahmestellen 2004 und 2005.

Ein kurzer Überblick über die zeitliche Abfolge der Ereignisse im Zusammenhang mit der Versuchsfläche ist in Tabelle 1 gegeben. Im Ganzen wurden drei Probeentnahmen gemacht, im Jahre 2003 in den zwei Zwischenlagern und im 2004 und 2005 jeweils auf der Versuchsfläche. Im diesjährigen Vertiefungsblock wurden zusätzlich zu den Proben 2005 auch die Lagerproben 2003, die seither im Kühlschrank aufbewahrt wurden, analysiert. Die Resultate vom 2004 wurden aus der Arbeit des Vertiefungsblockes 2004 [BONETTI et al. 2004] übernommen. Parallel zu den Probeentnahmen wurden zweimal jährlich Vegetationsaufnahmen durch Lisa Eggenschwiler gemacht.

**Tabelle 1:** Chronologische Übersicht der Ereignisse

Juni 03	Probeentnahme der Lager
Juni 03	Versuchsfläche angelegt und ausgesät
August 03	Neue Aussaat
September und Oktober 03	Vegetationsaufnahme
April 04	Probeentnahme auf Versuchsfläche
April und Mai 04	Vegetationsaufnahme
Juni und Oktober 04	Schnitt der Vegetation
April 05	Probeentnahme auf Versuchsfläche
Mai und Juni 05	Vegetationsaufnahme

## 2.2 Fragestellung

In der vorliegenden Arbeit soll auf folgende Fragen eingegangen werden:

- Lager: Können mit Hilfe der Lagerproben Aussagen zu einer allfälligen Verdichtung und Qualität der Lager gemacht werden?
- Zeitreihe: Wie haben sich die Böden zeitlich entwickelt und kann eine Regeneration des beeinträchtigten Bodens festgestellt werden?
- Vegetation: Ist ein Zusammenhang zwischen den gemessenen bodenphysikalischen Parametern und dem Pflanzenwachstum vorhanden?

### 3 Theoretische Grundlagen

#### 3.1 Korngrößenverteilung

Mit der Korngrößenverteilung (Textur) wird die Zusammensetzung der Feinerde (Sand, Schluff, Ton) beschrieben. Die Kornfraktion mit einem Durchmesser kleiner als zwei Millimeter wird als Feinerde, die übrigen Fraktionen als Skelett bezeichnet. In Tabelle 2 ist die Einteilung der Feinerde dargestellt. Diese Korngrößenverteilung ist die Grundlage für die Einteilung in Bodenarten mittels Körnungsdreiecken.

**Tabelle 2:** Definition der Kornfraktionen nach [BGS 1979])

FRAKTION	KORNDURCHMESSER [ $\mu m$ ]
Sand	50 - 2000
Schluff	2 - 50
Ton	< 2

#### 3.2 pH-Wert

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Konzentration der  $H^+$ -Ionen. Der pH-Wert eines Bodens beruht auf dem Gehalt der Böden an gelösten und Feststoffsäuren. Viele Eigenschaften von Böden stehen zudem in mehr oder weniger engem Zusammenhang mit dem pH-Wert. Er wird zur Einteilung der Böden verwendet (Tabelle 3 [SCHEFFER und SCHACHSCHABEL 1998]).

**Tabelle 3:** Definition der Kornfraktionen ([BGS 1979])

BEZEICHNUNG	pH	BEZEICHNUNG	pH
neutral	7.0		
schwach sauer	6.9 - 6.0	schwach alkalisch	7.1 - 8.0
mässig sauer	5.9 - 5.0	mässig alkalisch	8.1 - 9.0
stark sauer	4.9 - 4.0	stark alkalisch	9.1 - 10.0
sehr stark sauer	3.9 - 3.0	sehr stark alkalisch	10.1 - 11.0
extrem sauer	< 3.0	extrem alkalisch	> 11.0

#### 3.3 Organische Substanz

Zur organischen Substanz der Böden gehören alle in und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Überreste und deren organische Umwandlungsprodukte. Die organische Substanz begünstigt die Bildung und Stabilität eines grobporigen Aggregatgefüges, welches seinerseits die Durchlüftung, die Wasserinfiltration und die Durchwurzelbarkeit des Bodens fördert. Darüber hinaus besitzt sie eine hohe Wasserkapazität und vermag das Drei- bis Sechsfache ihres Eigengewichtes an Wasser zu speichern. Der Humus

verleiht dem Boden eine dunkle Farbe und begünstigt damit die Erwärmung der Böden im Frühjahr. Zudem dient die organische Substanz den Pflanzen als Nährstoffreservoir. Sie speichert Nährstoffe (vor allem Phosphor und Stickstoff) und verhindert somit deren Auswaschung im Oberboden. Die organische Substanz ist auch die Lebensgrundlage der heterotrophen Bodenorganismen, es besteht eine enge Beziehung zwischen Gehalt an organischer Substanz und biologischer Aktivität [SCHEFFER und SCHACHSCHABEL 1998].

### 3.4 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte hängt unter anderem von der Zusammensetzung des Bodens und vom Anteil an organischer Substanz ab. Sie ist ein gutes Mass, um allfällige Verdichtungen zu erkennen. Je geringer die Lagerungsdichte derselben Bodenart ist, umso weniger stützen sich die Körner gegenseitig ab. Der Boden ist verdichtungsgefährdeter. Für die Wurzeln ist ein lockerer Boden wichtig. Daher ist die Lagerungsdichte ein indirektes Mass für die Durchwurzelbarkeit eines Bodens. Ist der Boden jedoch zu locker, beeinträchtigt dies das Pflanzenwachstum. Die Pflanzenwurzeln finden zu wenig Halt. Landwirtschaftliche Böden gelten bei 1.5 bis 1.6 g/cm<sup>3</sup> als noch gut durchwurzelbar [BERLI et al. 1999].

Die effektive Lagerungsdichte berücksichtigt zusätzlich den Tongehalt des Bodens und wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$\text{Effektive Lagerungsdichte [g/cm}^3\text{]} = \text{Lagerungsdichte [g/cm}^3\text{]} + 0.009 \cdot \text{Tongehalt [\%]}$$

Der Tongehalt wird bei der effektiven Lagerungsdichte berücksichtigt, da der Ton aufgrund seiner sperrigen Plättchen ein grösseres Porenvolumen als Schluff oder Sand hat. So weist ein tonhaltiger Boden aufgrund seiner Struktur immer eine geringere Lagerungsdichte auf. Die effektive Lagerungsdichte ist somit ein besseres Mass für Verdichtung.

### 3.5 Porosität

Die Fruchtbarkeit des Bodens ist unter anderem von seiner Porosität bestimmt. Die Porosität beeinflusst den Bodenwasser- und Lufthaushalt und damit das pflanzenverfügbare Wasser und den Sauerstoffgehalt des Bodens. Die Stoff- und Wassertransporte werden im Boden unter anderem durch das Porenvolumen und die Porengeometrie beeinflusst. Man unterscheidet generell zwei Porenklassen, nämlich Primärporen und Sekundärporen. Primärporen sind körnungsbedingte Poren, die aus Form und Packung der Einzelkörner

**Tabelle 4:** Porengrössenklassifizierung [BUWAL 2001]

PORENKLASSE	PORENDURCHMESSER [ $\mu\text{m}$ ]
Grobporen	> 50
grobe Mittelporen	10 - 50
feine Mittelporen	0.2 - 10
Feinporen	< 0.2

resultieren. Sekundärporen sind Hohlräume, die sich zwischen den einzelnen Aggregaten befinden. Sie entstehen durch Schrumpfen und Quellen, biologische Aktivität und Bio- und Kryoturbation. Ausserdem sind sie weniger gewunden und liegen oft in vertikaler Richtung. Sie sind für Stofftransporte im Boden besonders geeignet. Es werden grundsätzlich drei verschiedene Porengrössenbereiche unterschieden: Grob-, Mittel- und Feinporen (Tabelle 4).

**Grobporen:** Diese Poren binden das Wasser nur bedingt und werden daher durch die Schwerkraft rasch entwässert. Sie sind massgebend für die Durchlüftung des Bodens. Zudem sind sie fürs Wurzelwachstum und für die mikrobielle Aktivität wichtig, da der Durchmesser der Feinwurzeln meistens im Grobporenbereich liegt. In unseren Versuchen wurde zur Grobporenberechnung die gesättigte Probe auf 60 hPa entwässert. 60 hPa entspricht  $25 \mu m$  Porenradius nach der folgenden Formel aus [FLÜHLER und ROTH 2002],

$$h_m = -\frac{0.15}{r} 10^{-4} [m]$$

wobei:  $h_m$  = Saugspannung in [m];  $r$  = Porenradius in [m].

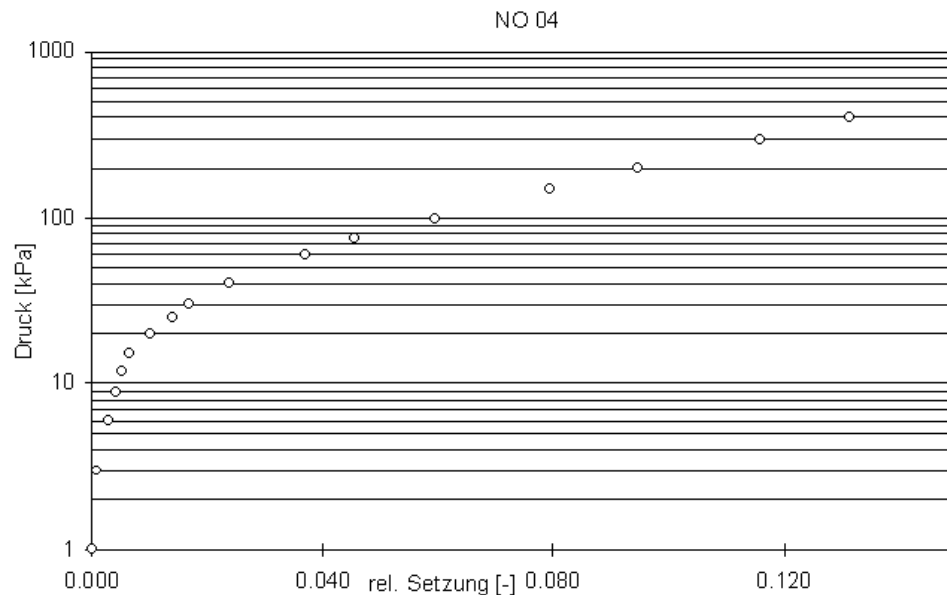
**Mittelporen:** Die Mittelporen haben die Fähigkeit das Kapillarwasser zu speichern, das noch pflanzenverfügbar ist. In diesen Poren sind Pilzmyzele, Wurzelhaare und Bakterien lebensfähig, welche für die Bodenaktivität wichtig sind. Die Mittelporen entsprechen in unseren Analysen den Poren, die zwischen 60 und 500 hPa desorbiert wurden. Nach der obigen Formel entspricht dies den Poren mit einem Radius zwischen 50 und  $6 \mu m$ .

**Feinporen:** Diese Poren binden das Wasser so stark, dass es nicht mehr pflanzenverfügbar ist. Unter humiden Klimabedingungen sind sie immer wasserführend. Feinporen sind unbelebt, denn sie sind für Mikroorganismen nicht zugänglich. Für die Feinporenberechnung wurden die Proben bis auf 500 hPa desorbiert. Nach der obigen Formel ergibt sich, dass unsere Analyse Poren kleiner  $6 \mu m$  als Feinporen einteilt.

**Gesamtporen:** Das Gesamtporenvolumen ist die Summe aus Fein-, Mittel- und Grobporen. Es ist von der Bodenart oder Körnung abhängig. In der Regel geht eine Zunahme des Porenvolumens mit einer Abnahme der Korngrösse einher. Aus diesem Grund gilt: Tonböden, welche eher ein plattenförmiges Porensystem besitzen, weisen ein grösseres Porenvolumen auf, während Sandböden mit ihrer eher kugelförmigen Struktur ein kleineres Porenvolumen besitzen [SCHEFFER und SCHACHSCHABEL 1998].

### 3.6 Vorbelastung

Die Vorbelastung ist ein Mass für die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens. Sie gibt an, wie stark der Boden bereits belastet wurde und bis zu welcher erneuten Belastung keine zusätzliche Verdichtung zu erwarten ist [BEW 1997]. Der Wert der Vorbelastung wird anhand der Drucksetzungskurve bestimmt, welche mit Hilfe des Ödometers ermittelt wird. Die Drucksetzungskurve zeigt die Beziehung zwischen dem vertikalen Auflastdruck und der relativen Setzung (Abbildung 3). Sie besteht aus einem flacheren Bereich, dem Wiederverdichtungsbereich, und einem steileren Bereich, dem Erstverdichtungsbereich. Der Übergang vom Wiederverdichtungsbereich zum Erstverdichtungsbereich wird als Vorbelastung definiert [DVWK 1995].



**Abbildung 3:** Beispiel einer Drucksetzungskurve

Im Wiederbelastungsbereich ist die Verformung des Bodenkörpers elastisch. Sobald die Belastung entfernt wird, kehrt der Boden in seinen ursprünglichen Zustand zurück. Die Struktur bleibt unverändert. Überschreitet aber die Belastung die Vorbelastung, so wird der Boden irreversibel verformt. Der Anfangszustand kann nach seiner Entlastung nicht mehr erreicht werden. Der Maximalwert der neuen Belastung wird zur neuen, höheren Vorbelastung [SCHULIN 2000]. Je geringer die Vorbelastung des Bodens ist, desto kleinere Drücke sind nötig, um den Boden plastisch, d.h. irreversibel zu verformen. Der Wert der Vorbelastung ist nach DVWK [1995] nicht nur von der früheren Auflast, sondern auch von den bodeneigenen Kennwerten wie zum Beispiel Korngrösse, Gefüge, Verfestigungsgrad und besonders vom aktuellen Bodenfeuchtezustand abhängig.

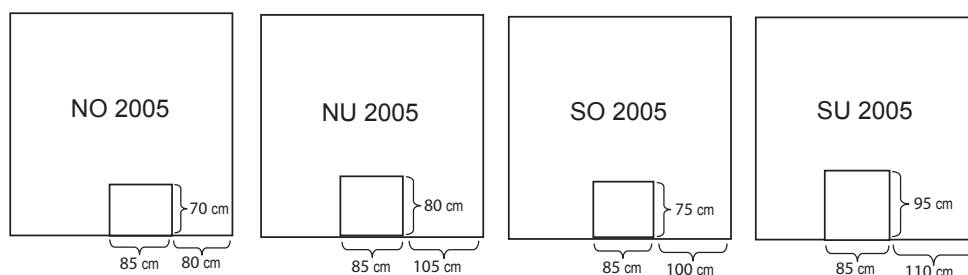
### 3.7 Kompressionsbeiwert

Der Kompressionsbeiwert (KB) ist ein zusätzlicher Parameter bei der Auswertung von Drucksetzungskurven. Der KB ist eng verwandt mit der Steifigkeit eines Bodens. Die Steifigkeit gibt die Kraft an, die aufzuwenden ist, um eine gewisse Verformung bzw. Setzung des Bodens zu bewirken. Je kleiner der KB, desto steifer und unempfindlicher ist der Boden. Der KB steht in engem Zusammenhang mit der Lagerungsdichte. Je grösser die Lagerungsdichte ist, desto mehr sind die einzelnen Bodenpartikel ineinander verkeilt. Je verkeilter die Bodenpartikel sind, desto weniger beweglich sind sie und um so weniger leicht verformbar und um so steifer ist der Boden.

## 4 Methoden

### 4.1 Probenahme

Die Probeentnahme erfolgte am 14. April 2005. Wie auf der Abbildung 2 zu sehen ist, wurden die Proben im gleichen Streifen wie im Vorjahr genommen. Damit sollen ähnliche Randeffekte auf die Entnahmestellen vorhanden sein. Es wurden jeweils fünf Burgerzylinder in 12 - 22 cm Tiefe, zwei Sackproben in der gleichen Tiefe und fünf Plastikzylinder in der Tiefe 15 - 19 cm genommen. Durch die Probeentnahme entstanden rechteckige Gruben (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Genauer Ort der Probeentnahme im 2005.

Die Probenanalysen aus dem Jahr 2004 stammen aus der Arbeit [BONETTI et al. 2004]. Die Proben aus dem Jahr 2003, die im Kühlschrank lagerten, wurden zusätzlich zu den Proben aus dem 2005 im Rahmen dieser Arbeit ausgewertet. In den nachfolgenden Resultaten ist aufgrund der verschiedenen Herkunftsorte der Proben folgendes zu beachten: Die Proben aus dem Jahr 2004 und 2005 stammen aus der Versuchsfläche, die Proben aus dem Jahr 2003 sind Proben aus den Zwischenlagern.

Die Sackproben wurden bei 105°C getrocknet und auf zwei Millimeter gesiebt. Die getrockneten und gesiebten Sackproben wurden zur Bestimmung der organischen Substanz und der Korngrößenverteilung gebraucht, sowie an das Labor der Firma NIUTEC in Winterthur zur Schwermetallanalyse geschickt. Die pH-Bestimmung erfolgte mit noch feuchter und ungesiebter Sackprobenerde. Die Analyse der Burgerzylinder und Plastikzylinder sind in den Kapiteln 4.5 und 4.6 zu finden.

Die Proben aus 70-80 cm Tiefe wurden mit SO und NO verglichen, die Proben in 120-130 cm Tiefe mit SU und NU.

Erwähnenswert ist, dass die Farbe und eine Fühlprobe der verschiedenen Böden auf unterschiedliche Qualitäten zurück schliessen liess. Gemäss mündlicher Mitteilung von Hans Pfister, sei die anaerobe Zone der Lager nicht nur deutlich gräulicher gewesen, sondern auch die Struktur des Südbodens viel kompakter gewesen. Ähnliche Unterschiede waren auch bei den diesjährigen Proben festzustellen.



## 4.2 Korngrößenverteilung

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde mit der Pipettmethode durchgeführt [FAL 1997]. Die Methode beruht auf dem Gesetz von Stokes, wonach die Sinkgeschwindigkeit vom Durchmesser eines festen Körpers in einer Flüssigkeit abhängig ist.

Pro Boden wurden 5 g humusfreies (nassveraschtes) und trockenes Bodenmaterial in einer 0.2 % Calgonlösung mit Hilfe von Ultraschall dispergiert, in einen 500 ml grossen Standzylinder eingefüllt und mit Calgonlösung bis zur 500 ml Marke aufgefüllt. Nachdem der Zylinder gut geschüttelt worden war, wurde mit der Zeitmessung begonnen.

Nach 84 Sekunden und nach 2 Stunden wurden in der Tiefe von 19 und 2.6 cm mit einer Pipette je zweimal 10 ml der Suspension entnommen, bei 105°C getrocknet und anschliessend gewogen.

## 4.3 pH-Wert

Die pH-Messung erfolgte noch in feuchtem Zustand des Bodens in einer 0.01 M  $\text{CaCl}_2$ -Lösung im volumetrischen Verhältnis von ca. 1/3 Boden und 2/3  $\text{CaCl}_2$ . Die Suspension wurde dreimal in einem Abstand von je zehn Minuten geschüttelt. Danach erfolgte die pH-Messung mittels einer Glaselektrode, die in die überstehende klare Suspension solange eingetaucht wurde, bis sich ein konstanter Wert auf der Anzeige des pH-Meters eingestellt hatte [FAL 1997].

## 4.4 Organische Substanz

Der Gehalt an organischer Substanz wurde mittels Nassveraschung mit Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) bestimmt. Dazu wurde 50 g Feinerde ( $< 2\text{mm}$ ) in einen Becher gegeben, auf ein geheiztes Sandbett gestellt und mit einer  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Lösung nassverascht. Die Oxidation wurde solange wiederholt, bis die organische Substanz vollständig oxidiert war. Aus der Differenz des Gewichtes vor und nach der Veraschung, welche der Masse des organischen Materials entspricht, konnte der Gewichtsanteil der organischen Substanz berechnet werden. Die Methode der Nassveraschung wird bei Hartge [1992] als Vorbereitung zur Bestimmung der Korngrößenverteilung beschrieben.

## 4.5 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte wurde mit zwei verschiedenen Methoden bestimmt. Einerseits wurden die Burgerzylinder aus dem Ödometer im Ofen bei 105°C getrocknet und anschliessend gewogen. Da das Volumen der Burgerzylinder bekannt ist (1 Liter), lassen sich die Lagerungsdichten direkt aus den gemessenen Gewichten bestimmen. Andererseits konnte die Lagerungsdichte aus dem Desorptionsversuch bestimmt werden. Auch diese Proben wurden im Ofen bei 105°C getrocknet und anschliessend gewogen [BLAKE und HARTGE 1986].

## 4.6 Desorption

Die Porenvolumina wurden in dieser Arbeit mit zwei verschiedenen Probenahmegefäßen bestimmt, einerseits mit den Burgerzylindern und andererseits mit den Plastikzylindern. Ein Methodenvergleich ist im Anhang 11.3 zu finden.

### Plastikzylinder (0.3 Liter):

Die Plastikzylinder wurden gesättigt, auf ein ebenfalls gesättigtes Kaolinbett gesetzt und dort bis 60 hPa desorbiert. Anschliessend wurden sie gewogen und zurück auf das Kaolinbett gesetzt und weiter bis 500 hPa desorbiert. Nach dem Erreichen der Saugspannung wurden sie nochmals gewogen, bei 105°C getrocknet und nochmals gewogen. Aus diesen Analysen ergeben sich Daten für Fein-, Mittel- und Grobporenvolumen.

### Burgerzylinder (1 Liter):

Die Burgerzylinder wurden gesättigt, auf ein gesättigtes Sandbett gestellt, auf 60 hPa desorbiert. Anschliessend wurden die Zylinder im Ofen bei 105°C getrocknet. Nach dem Auswerten ergeben sich zwei Porenwerte: der erste Wert umfasst die Fein- und Mittelporen, der zweite Wert die Grobporen.

Zwischen den verschiedenen Stufen wurden die Proben jeweils gewogen, um den Wasserverlust ermitteln zu können. Das Trockengewicht sowie die oben angegebenen Porenvolumina des Bodens konnten so berechnet werden [BLAKE und HARTGE 1986].

## 4.7 Ödometerie

Mit Hilfe einer Ödometeranlage der Firma Wille Geotechnik (Göttingen, Deutschland) wurde das Setzungsverhalten der vier Böden bestimmt. Die Verdichtung erfolgt uniaxial, da die Seitenausdehnung durch den Burgerzylinder verhindert wird. Dies ist die übliche Messart für die Bestimmung der Vorverdichtung mittels der Drucksetzungskurve. Beim Start der Ödometeranlage wird der Druck hydraulisch bei konstanter Geschwindigkeit mit einem Stempel bis zur gewünschten Auflast gesteigert. Es können verschiedene Laststufen im Bereich von 0 bis 2000 kPa aufgebracht werden und die dabei auftretende Setzung wird mit einer Genauigkeit von 10  $\mu m$  gemessen.

Je drei Proben pro Boden wurden für den Versuch vorerst in einem Wasserbad während mindestens 24 Stunden mit deionisiertem Wasser aufgesättigt. Darauf wurden sie auf einem Sand- oder Kaolinbett auf 60 hPa Saugspannung konditioniert. Die Saugspannung wurde mit Hilfe von Tensiometern gemessen, welche bei jeder vierten Probe angebracht waren. Größere Steine in der Stirnfläche der Proben wurden entfernt und die Hohlräume mit derselben Erde aufgefüllt. Die folgenden Druckstufen sind aufgebracht worden: 3, 6, 9, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 75, 100, 150, 200, 300, 400 kPa. Eine Druckstufe wurde 30 Minuten beibehalten und die Setzung auf dem Computer mit dem HP-Programm BODEMA gespeichert. Das Programm registrierte die Setzung fortlaufend. Mit diesen Werten konnte die Drucksetzungskurve erstellt werden, welche die relative Setzung in Abhängigkeit des aufgetragenen Druckes

darstellt. Aus dieser Drucksetzungskurve wurde die Vorbelastung gemäss den Bodenschutzrichtlinien [BEW 1997] nach der graphischen Methode von Casagrande [1936] bestimmt. Im Anhang 11.2 ist die Beschreibung zur Bestimmung der Vorbelastung mittels Drucksetzungskurve erläutert. Zur Bestimmung der Vorbelastung wurde jede Kurve von zwei Personen unabhängig voneinander ausgewertet. Für die weiteren Auswertungen wurde das arithmetische Mittel der so erhaltenen Vorbelastungswerte verwendet.

Der Kompressionsbeiwert (KB) ist gleich der Steigung der Erstverdichtungsgerade der Drucksetzungskurve. Je flacher die Erstverdichtungsgerade ist, desto mehr Druck muss aufgebracht werden, um eine gewisse Setzung zu erreichen. Damit ist der Kompressionsindex ein Hinweis auf die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens. Die Definition kann in Amann [2002] nachgeschlagen werden.

Rechnerisch lässt er sich aus der Porenzifferänderung  $\Delta n$  und der Änderung des Logarithmus des Auflastdrucks berechnen:

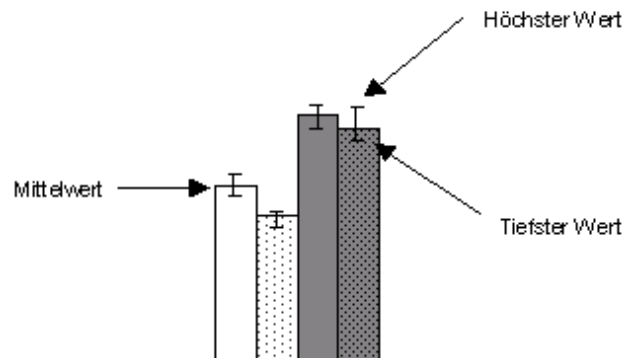
$$KB = \frac{\Delta n}{\log(p_2/p_1)}$$

Wobei:

$$\Delta n = \frac{\text{Porenvolumenaenderung } \Delta V_P}{\text{Festmassenvolumen } V_m}$$

## 5 Resultate

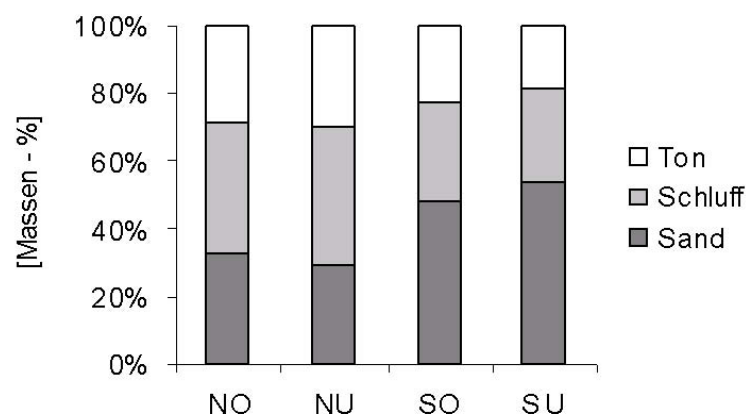
Wenn nicht anders vermerkt, gelten für die Balkendiagramme die in Abbildung 5 dargestellten Erläuterungen. Es wurden jeweils drei Messungen durchgeführt, deren Mittelwert in der Balkenhöhe abzulesen ist. Der höchste bzw. der tiefste Messwert ist am oberen bzw. am unteren Ende des vertikalen Striches dargestellt. Der Oberboden des Südlagers (SO und SU) ist stets in dunkler Farbe dargestellt, der Oberboden des Nordlagers (NO und NU) in heller Farbe. An dieser Stelle soll auch nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die Proben aus dem Jahr 2003 vom Zwischenlager und diejenigen von 2004 und 2005 von der ausgetragenen Rekultivierungsfläche stammen.



**Abbildung 5:** Erläuterung des Balkendiagramms. Die Höhe des Balkens repräsentiert den Mittelwert, das obere bzw. das untere Ende des Strichs jeweils den höchsten bzw. den tiefsten Messwert.

### 5.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung ändert sich in der Zeit nur sehr langsam und zwar als Folge der Verwitterung und Tonverlagerung [FLÜHLER und ROTH 2002]. Auch in unserer Zeitreihe sind über die drei Jahre nur marginale Unterschiede in der Körnung festzustellen. In Abbildung 6 sind daher nur die Resultate der Proben von 2005 dargestellt. Die Bodenart wurde anhand des Körnungsdiagramms bestimmt (BGS 1979, Tabelle 5). Das Körnungsdiagramm gemäss [SOIL SURVEY STAFF 1997] liefert in diesem Fall eine identische Bezeichnung der Bodenart. Die Böden aus dem Nordlager haben einen höheren Ton- und Schluffgehalt als diejenigen aus dem Südlager. Hingegen weist das Südepot einen höheren Sandanteil auf.



**Abbildung 6:** Korngrößenverteilung in [Massen-%] der vier Böden. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert einer Doppelbestimmung von den Proben 2005.

**Tabelle 5:** Bestimmung der Bodenart mittels Körnungdiagramms nach [BGS 1979]. Die Resultate sind vom 2005 und in [Massen-%] angegeben.

	SAND	SCHLUFF	TON	BODENART
NO	33	38	29	Lehm
NU	29	40	30	toniger Lehm
SO	47	30	23	Lehm
SU	54	27	19	sandiger Lehm

## 5.2 pH-Wert

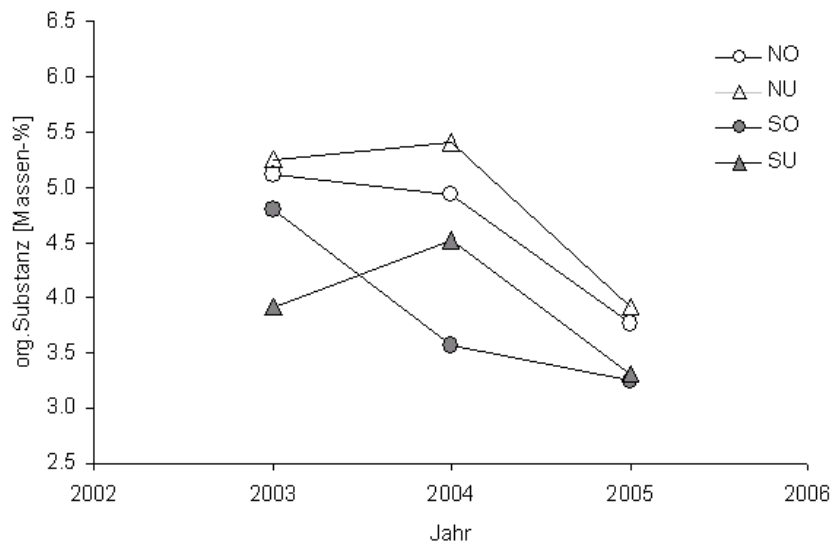
Die in Tabelle 6 aufgeführten Messwerte sind Mittelwerte aus drei Einzelmessungen. Die pH-Werte des Jahres 2003 und 2005 liegen im schwach alkalischen Bereich und sind deutlich höher als die im Jahr 2004 gemessenen, die auf schwach saure Verhältnisse schliessen lassen. Sehr wahrscheinlich ist dieser Unterschied auf eine analytische Messabweichung zurückzuführen. Ein Trend, wie sich der Boden vom Nordlager und derjenige vom Südlager entwickelt, ist nicht feststellbar.

**Tabelle 6:** Resultate der pH-Wertmessung. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert aus drei Einzelmessungen.

PH-WERT	2003	2004	2005
NO	7.2	6.8	7.1
NU	7.3	6.8	7.1
SO	7.4	6.6	7.3
SU	7.3	6.8	7.3

## 5.3 Organische Substanz

Die organische Substanz liegt in der Grössenordnung zwischen 3.5 und 5.5 %. Sie nimmt während den drei beobachteten Jahre tendenziell ab (Abbildung 7). Dieser Trend könnte damit erklärt werden, dass durch die Vegetation die biologische Aktivität zugenommen hat und somit die Veratmung der organischen Substanz erhöht wurde (Mineralisation). Eine andere Erklärung ist, dass die Vegetation im 2005 weniger weit entwickelt war und weniger Wurzeln enthielt. Die organische Substanz besteht nur aus abgestorbenem Material, kleine Wurzeln sind jedoch durch die Siebung nicht gänzlich zu entfernen. Der Oberboden aus dem Südlager hat sowohl im Lager wie auch auf der Rekultivierungsfläche stets einen geringeren Gehalt, was auf das Ausgangsmaterial zurückzuführen sein könnte.



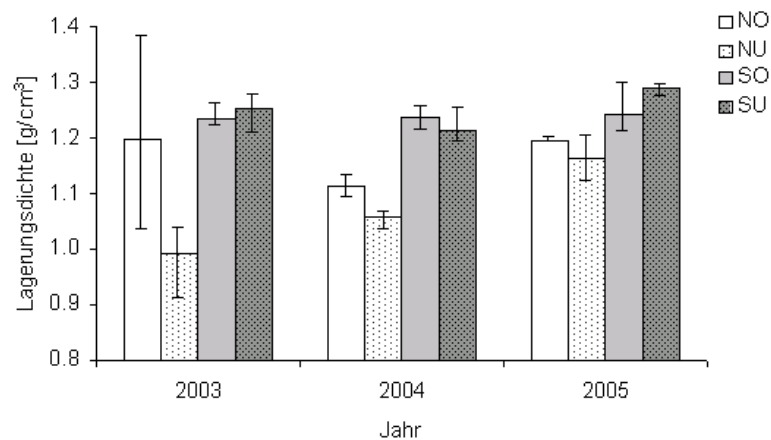
**Abbildung 7:** Organische Substanz in [Massen-%] in zeitlicher Abfolge. Es handelt sich hier um Einzelwerte.

#### 5.4 Lagerungsdichte

Mit der Lagerungsdichte kann erfasst werden, ob das Gesamtporenvolumen durch sich durch die Befahrung verändert hat. Es ist jedoch nicht festzustellen, welche Porengrößen sich verändert haben und ob ganze Bodenaggregate volumenkonstant verschert wurden.

Die Lagerungsdichten weisen Mittelwerte zwischen  $0.99 \text{ g/cm}^3$  (NU 2003) und  $1.29 \text{ g/cm}^3$  (SU 2005) auf (Abbildung 8). In der Literatur wird für Lehmböden eine natürliche Lagerungsdichte zwischen  $1.2$  und  $1.7 \text{ g/cm}^3$  angegeben [FLÜHLER und ROTH 2002]. Die Böden dieses Versuchs liegen deutlich im unteren Bereich und sind dementsprechend locker. Die Standardabweichung im Boden NO 2003 ist mit  $0.18 \text{ g/cm}^3$  deutlich am höchsten. Diese Abweichung könnte auf einen sehr hohen Skelettgehalt in einer Probe zurück zu führen sein. Denn eine Probe aus dem NO 2003 zeigt eine erhöhte Lagerungsdichte (Anhang Tabelle 17).

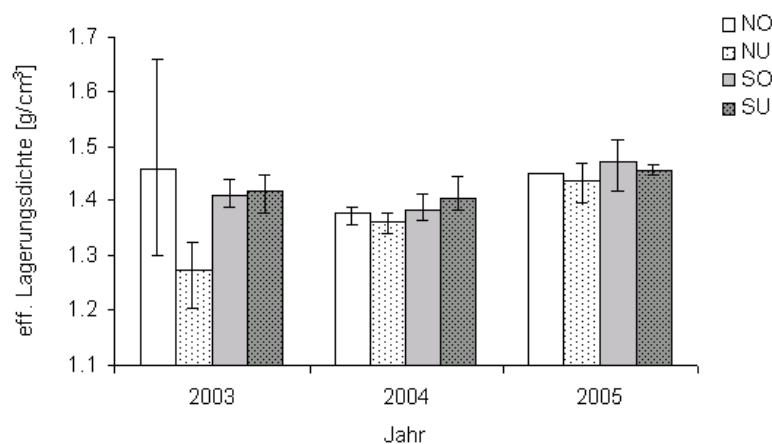
Eine höhere Lagerungsdichte weist auf ein kleineres Gesamtporenvolumen und einen geringeren Anteil an organischer Substanz hin. Im Jahre 2005 sind die Lagerungsdichten höher als im 2004, da der Boden stets einer natürlichen Setzung unterliegt und von Mähmaschinen befahren wurde. Festzuhalten ist, dass der Unterschied vom Süd- und Nordlager im 2005 deutlich geringer ist als im Vorjahr. Der Boden scheint sich folglich bezüglich dieses Parameters regeneriert zu haben.



**Abbildung 8:** Lagerungsdichte in  $[g/cm^3]$  aus den Bürgerzylindern. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.

Bei der effektiven Lagerungsdichte wird der Tongehalt mitberücksichtigt, wodurch die Verdichtung des Bodens besser beschrieben wird (Kapitel 3.4).

Sie ist höher als die Lagerungsdichte. Generell wird der Unterschied zwischen dem Nord- und dem Südlager abgeflacht, da das Norddepot tonreicher ist. Im 2003 ist ein deutlicher Unterschied zwischen dem nördlichen Oberboden und dem südlichen Oberbodenmaterial zu sehen. NO 2003 ragt über die anderen Messwerte hinaus, was die Vermutung auf eine Probe mit einem grösseren Skelettgehalt unterstreicht. Die effektive Lagerungsdichte beschreibt die Verdichtung gut. Die höheren Werte im südlichen Oberboden 2003 gegenüber dem nördlichen Oberboden 2003 bestätigen eine leichte Verdichtung des Südlagers (Abbildung 9).



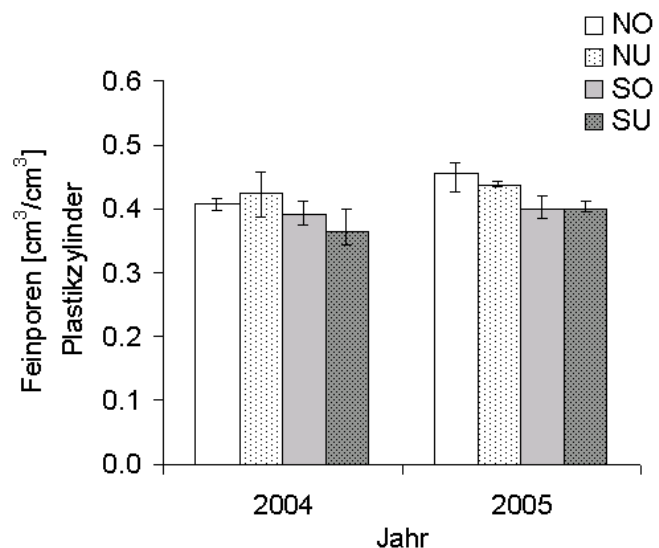
**Abbildung 9:** Effektive Lagerungsdichte in  $[g/cm^3]$ . Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.

## 5.5 Porenvolumina

Die Porenvolumina wurden, wie in Kapitel 4.6 beschrieben, mit zwei verschiedenen Methoden bestimmt. Welche Methode für das entsprechende Porenvolumen verwendet wurde, ist den Überschriften zu entnehmen. Bei der Beprobung der Lager im Jahre 2003 wurden Burgerzylinder, jedoch keine Plastikzylinder genommen. Entsprechend fehlen Werte für Plastikzylinder für das Jahr 2003.

### 5.5.1 Feinporen - Plastikzylinder

Der nördliche Oberboden hat generell einen grösseren Feinporenanteil, was mit dem höheren Tongehalt erklärt werden kann. Die Feinporen widerspiegeln Texturporen. Im 2005 gibt es minim mehr Feinporen als im 2004, dieser kleine Unterschied kann durchaus von der Heterogenität des Bodens stammen (Abbildung 10).

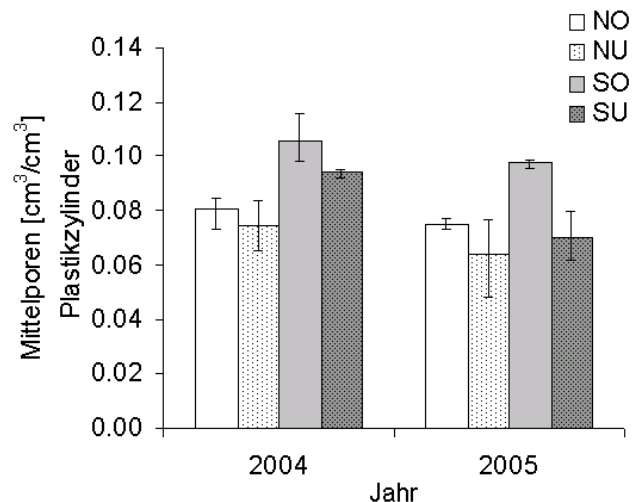


**Abbildung 10:** Feinporenvolumen in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$  der Jahre 2004 und 2005, berechnet aus dem Desorptionsversuch. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.



### 5.5.2 Mittelporen - Plastikzylinder

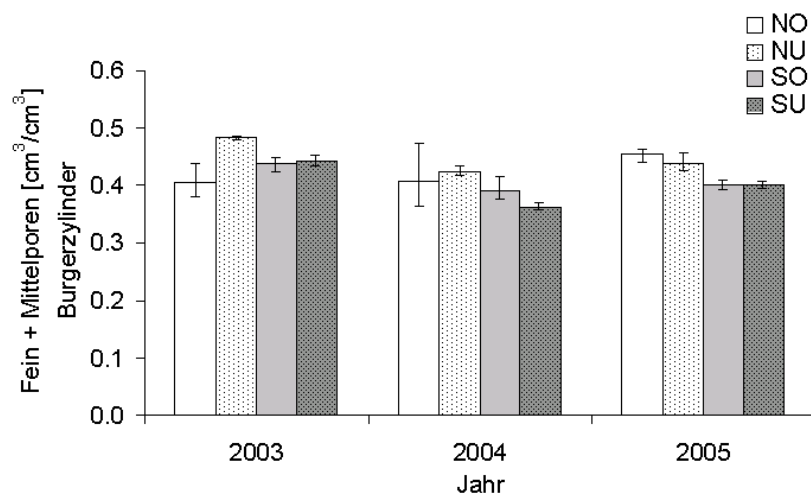
Die Mittelporenwerte sind im südlichen Oberboden etwas höher. Wo möglich ergibt der höhere Sandanteil im Süden den höheren Mittelporenwert. Vom 2004 bis 2005 nimmt der Mittelporenanteil etwas ab. Die Mittelporenwerte ändern sich aber nur sehr wenig (Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Mittelporenvolumen in [cm³/cm³] der Jahre 2004 und 2005, berechnet aus dem Desorptionsversuch. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.

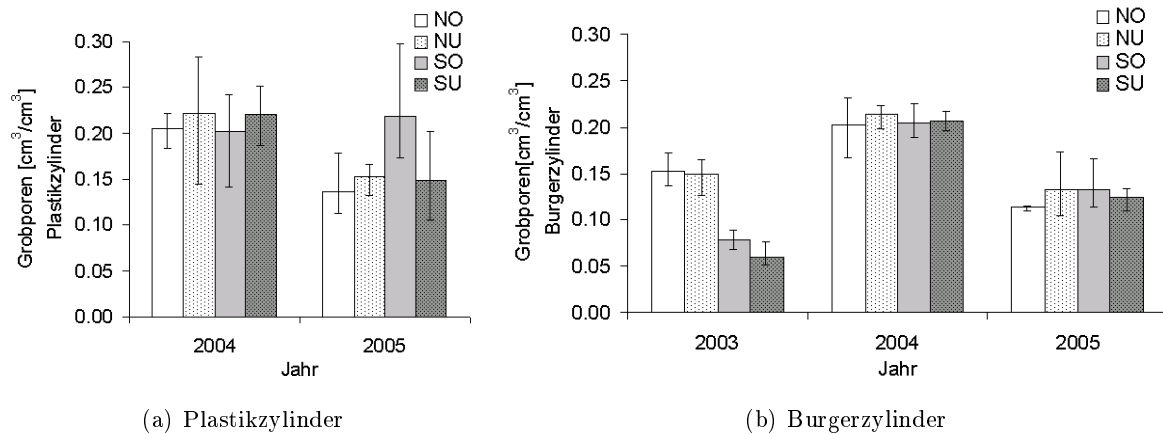
### 5.5.3 Fein- und Mittelporen - Burgerzylinder

In den Resultaten der Burgerzylinder (Abbildung 12) sind zusätzlich Fein- und Mittelporen des 2003 zu sehen. Es ist kein deutlicher Unterschied des Fein- und Mittelporenraumes zwischen Lager und Rekultivierungsfläche zu erkennen, auch kann keine zeitliche Entwicklung festgestellt werden.



**Abbildung 12:** Fein- und Mittelporenvolumen in [cm³/cm³] über alle drei Jahre, berechnet aus den Burgerzylindern. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.

### 5.5.4 Grobporen - Plastik- und Burgerzylinder

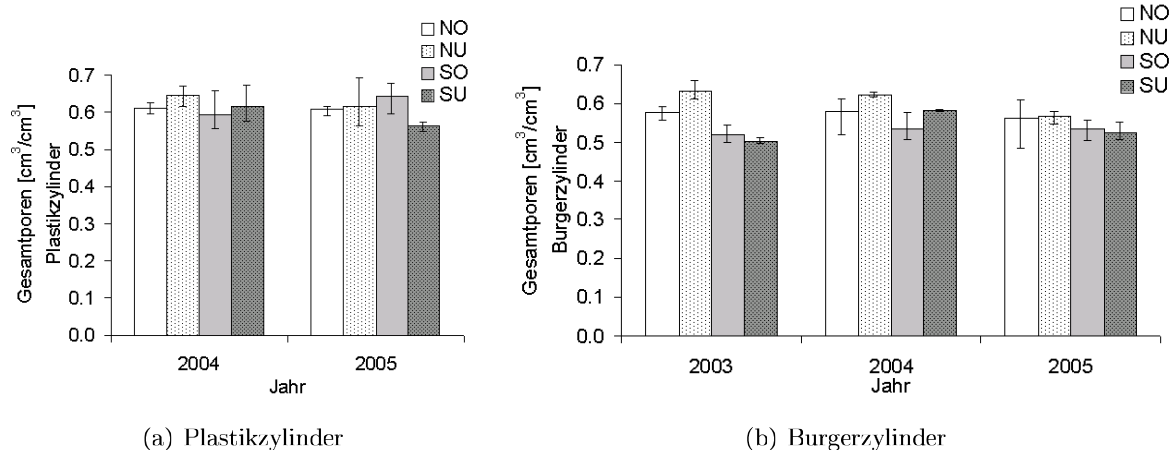


**Abbildung 13:** (a) Grobporenvolumen in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$  der Jahre 2004 und 2005, berechnet aus dem Desorptionsversuch. (b) Grobporenvolumen in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$  über alle drei Jahre, berechnet aus den Burgerzylindern. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.

Das Grobporenvolumen, das aus der Desorption der Burgerzylinder ermittelt wurde, zeigt sehr schön den Zusammenhang zwischen Vorbelastung (Kapitel 5.6) und Grobporenvolumen. Die Grobporen sind im unverdichteten nördlichen Oberboden deutlich höher als im südlichen Oberboden. Durch das Ausbringen des Bodens auf die Rekultivierungsfläche wurde er gelockert, das Grobporenvolumen hat folglich zugenommen. Erstaunlich ist, dass das Grobporenvolumen vom nördlichen wie vom südlichen Boden ähnliche Werte aufweist. Die Verdichtung des südlichen Lagers konnte demnach bezüglich den Grobporen durch die Schüttung wieder gut gemacht werden. Eine Regenerierung des Bodens kann also auch durch diesen Parameter bestätigt werden. Jedoch ist zu bemerken, dass nicht alleine das Grobporenvolumen, sondern auch Verteilung, Form und Vernetzung der Grobporen für einen gesunden Boden wichtig sind. Somit ist Vorsicht geboten, nur aufgrund des Grobporenvolumens von einer Regeneration zu sprechen. Im 2005 nimmt das Grobporenvolumen in beiden Böden aufgrund natürlicher Setzung und landwirtschaftlicher Bearbeitung wieder ab (Abbildung 13).

### 5.5.5 Gesamtporen - Plastik- und Burgerzylinder

Die Gesamtporosität liegt zwischen 50 und 60 % (Abbildung 14), was für einen gesunden Boden spricht. Der Boden aus dem nördlichen Lager zeigt generell eine höhere Porosität, was auf Texturunterschiede zurückzuführen sein kann (vgl. Kapitel 5.5.1). Das Bodenmaterial aus dem nördlichen Lager hat einen grösseren Tongehalt und somit auch eine etwas erhöhte Gesamtporosität. Da der Fein- und Mittelporenraum etwa gleich bleibt, sind die zeitlichen Unterschiede auf die Grobporen zurückzuführen (vgl. Kapitel 5.5.4). Das Gesamtporenvolu-

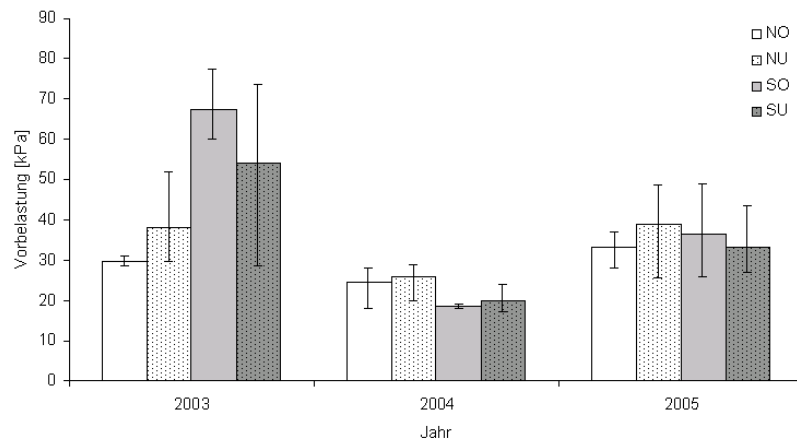


**Abbildung 14:** (a) Gesamtporenvolumen in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$  der Jahre 2004 und 2005, berechnet aus dem Desorptionsversuch. (b) Gesamtporenvolumen in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$  über alle drei Jahre berechnet aus den Burgerzylindern. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.

men ändert sich wenig. Die Gesamtporosität steht in einem engen Zusammenhang mit der Lagerungsdichte (Anhang 11.4).

## 5.6 Vorbelastung

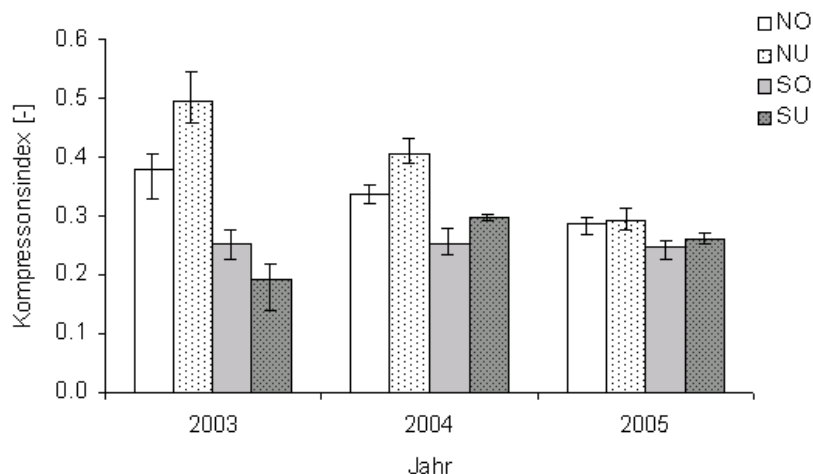
Beim Vergleich der Werte für das Jahr 2003 vom nördlichen und südlichen Zwischenlager können deutliche Unterschiede festgestellt werden (Abbildung 15). Das südliche Lager hat eine klar höhere Vorbelastung. Dies gibt die Verdichtung des südlichen Lagers wieder. Im Jahr 2004 zeigen beide Böden auf der Versuchfläche sehr geringe Vorbelastungswerte auf, die sich zwischen 20 und 30 kPa liegen. Durch das Ausbringen und die damit verbundene Lockerung scheinen die Verdichtungsanzeichen vom Lager verschwunden zu sein. Gemäss dieses Parameters scheint sich der Boden angeglichen und erholt zu haben. Der nördliche Oberboden weist tendenziell im 2004 und 2005 sogar etwas höhere Vorbelastungen auf. Das ist womöglich auf den höheren Tongehalt des Nordlagerbodens zurück zu führen, denn tonige Böden sind bekanntlicherweise verdichtungsanfälliger. Im 2005 liegen alle Vorbelastungen wieder höher als im 2004, was aufgrund der natürlichen Setzung zu erwarten ist. Die zum Teil grosse Streuung erklärt sich damit, dass das Verfahren nach Casagrande [1936] (vgl. Anhang 11.2) bei der Wahl der Erstverdichtungsgerade grosse Unsicherheiten in sich birgt und von verschiedenen Personen etwas anders ausgewertet werden kann.



**Abbildung 15:** Vorbelastungswerte in [kPa], ausgewertet mit dem Verfahren nach Casagrande [1936]. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.

### 5.7 Kompressionsbeiwert

Der Kompressionsbeiwert zeigt 2003 einen deutlichen Unterschied zwischen Nord- und Südlager. Der kleinere Kompressionsbeiwert im südlichen Lager spricht für eine Verdichtung dieses Lagers. Über die Jahre gleichen sich die Werte an. Im Jahre 2004 ist immer noch ein Unterschied zwischen den zwei Bodentypen zu sehen. 2005 haben sich die Kompressionsbeiwerte jedoch deutlich angeglichen (Abbildung 16).



**Abbildung 16:** Kompressionsbeiwert [-]. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert aus drei Messungen dar, der höchste Messwert entspricht dem oberen Ende des Striches, der kleinste Messwert dem unteren Ende des Striches.

## 5.8 Schwermetalle

Die Schwermetallgehalte wurden nur in den Lagerproben bestimmt, um festzustellen, ob das schlechte Anfangswachstum der Pflanzendecke des nördlichen Oberbodens auf eine Kontamination durch Schwermetalle zurückzuführen sein könnte. Die Analyse wurde extern und VBBo-konform [VBBo 1998] durchgeführt (Details siehe Anhang 11.1).

**Tabelle 7:** Resultate der Schwermetallanalyse in [mg/kg TS]. RW bedeutet Richtwert.

	NO	NU	SO	SU	RW
Pb	35	31	33	33	50
Cd	0.42	0.45	0.30	0.24	0.80
Cu	20	20	13	10	40
Zn	54	54	33	31	150

Wie in der Tabelle 7 zu sehen ist, überschreiten weder Zink, Kupfer, Blei noch Cadmium die Richtwerte der VBBo. Das nördliche Lager weist ausser bei Blei etwas höhere Schwermetallkonzentrationen auf, von einer übermässigen Schwermetallbelastung kann nicht gesprochen werden. Eine Hemmung des Pflanzenwachstums aufgrund einer Schwermetallkontamination ist auszuschliessen.

## 6 Diskussion

In der am 1. Oktober 1998 in Kraft getretenen Verordnung über Belastungen des Bodens [VBBo 1998] wird im Art. 1 der Zweck dieser Verordnung festgehalten. Danach ist die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit oberstes Ziel. In demselben Artikel ist die Rede von chemischen, biologischen sowie physikalischen Belastungen der Böden, die für die Bodenfruchtbarkeit entscheidend sind. Richt-, Prüf- und Sanierungswerte sind nur für chemische Eigenschaften gesetzlich geregelt. Für die biologische und physikalische Belastung bestehen nur Orientierungswerte. Dies obwohl ausdrücklich vermerkt ist, dass Bodenverdichtungen vermieden werden sollten. In einer Arbeitsgruppe der BGS wurden Vorschläge für Richt- und Prüfwerte zum Erfassen von Bodenverdichtungen gemacht [BGS 2004]. Darin wird die Ermittlung folgender Messgrößen vorgeschlagen:

- effektive Lagerungsdichte
- Grobporenvolumen
- gesättigte Wasserleitfähigkeit
- Eindringwiderstand

In unserer Arbeit wurden davon die effektive Lagerungsdichte sowie das Grobporenvolumen gemessen. Ein zusätzlicher auf Verdichtungen sehr sensibler Parameter ist die Vorbelastung. Die Vorbelastung wird mittels Ödometer gemessen. Dieser Versuch wird in der Praxis wenig verwendet, da er zeitaufwendig und teuer ist. Deshalb wurde die Vorbelastung auch nicht in BGS Publikation [2004] aufgenommen. Wie in Kapitel 4.7 beschrieben, kann aus der Auswertung der Drucksetzungskurve auch der Kompressionsbeiwert berechnet werden.

In unserer Arbeit wurden die folgenden auf Verdichtungen sensiblen Parameter untersucht:

- effektive Lagerungsdichte
- Grobporenvolumen
- Vorbelastung
- Kompressionsbeiwert

## 6.1 Beurteilung der Parameter

### 6.1.1 Vorbelastung

Wie bereits erwähnt, wurde als Indikator für die physikalische Belastung der Böden die Vorbelastung gemessen. Nach BGS [2004] gilt folgende Einteilung:

- $< 80$  kPa: stark verdichtungsempfindlich
- $80 - 110$  kPa: normal verdichtungsempfindlich
- $> 110$  kPa: wenig verdichtungsempfindlich

Mit anderen Worten, ab 80 kPa hat schon eine gewisse Verdichtung stattgefunden und ab 110 kPa ist die Verdichtung so gross, dass die Bodenfruchtbarkeit mit grosser Wahrscheinlichkeit beeinflusst ist. Alle gemessenen Werte sind unter 110 kPa, ja sogar unter 80 kPa. Im Südlager (SU und SO 2003) sind höhere Vorbelastungswerte als im Nordlager (NO und NU 2003) zu erkennen (Tabelle 8). Vorbelastungen in dieser Grössenordnungen sollten also keinen Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit und damit auf das Pflanzenwachstum haben.

**Tabelle 8:** Vorbelastungswerte in [kPa]. Die grössten Werte wurden in den südlichen Lagerproben (SO und SU 2003) gemessen.

	2003	2004	2005
NO	30	25	33
NU	38	26	39
SO	<b>67</b>	19	37
SU	<b>54</b>	20	33

### 6.1.2 Grobporenvolumen

Fast alle Messungen liegen weit über dem in BGS [2004] vorgeschlagenen Richtwert von 7 Volumenprozent (Tabelle 9). Nur knapp über diesem Richtwert liegt SO 2003, SU 2003 sogar leicht darunter.

**Tabelle 9:** Grobporenvolumen in [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ] der mit Burgerzylindern entnommenen Proben. Mit Ausnahme von SU 2003 liegen alle Werte über dem Richtwert von 7 Vol-%.

	2003	2004	2005
NO	15	20	11
NU	15	21	13
SO	<b>8</b>	20	13
SU	<b>6</b>	21	12

### 6.1.3 Effektive Lagerungsdichte

**Tabelle 10:** Effektive Lagerungsdichte in  $[\text{g}/\text{cm}^3]$  der mit Burgerzylindern entnommenen Proben.

	2003	2004	2005
NO	1.34	1.38	1.46
NU	1.36	1.36	1.45
SO	1.41	1.38	1.47
SU	1.42	1.40	1.46

Die effektive Lagerungsdichte lag bei allen Messungen unter dem in BGS [2004] angegebenen Richtwert von  $1.7 \text{ g}/\text{cm}^3$  (Tabelle 10). Dies spricht dafür, dass die Böden allesamt keine kritischen Bodenverdichtungen aufweisen.

### 6.1.4 Kompressionsbeiwert

In [BGS 2004] wird der Kompressionsbeiwert nach folgenden Erfahrungswerten eingeteilt:

- $< 0.07$  sehr stabil
- $0.07 - 1.00$  stabil
- $1.00 - 1.30$  mässig stabil
- $> 1.30$  wenig stabil

**Tabelle 11:** Kompressionsbeiwerte  $[-]$ . Die kleinsten Werte wurden in den südlichen Lagerproben (SO und SU 2003) gemessen.

	2003	2004	2005
NO	0.38	0.34	0.29
NU	0.49	0.41	0.29
SO	<b>0.25</b>	0.25	0.24
SU	<b>0.19</b>	0.30	0.26

Nach diesen Erfahrungswerten beurteilt liegen alle Messungen im stabilen Bereich. Es sind keine Werte im Bereich 'sehr stabil' zu finden, was für eine Verdichtung sprechen würde. Im 2003 ist das Südlager diesem Bereich näher als das Nordlager. Die weitere Entwicklung der Kompressionsbeiwerte zeigen eine Angleichung der Lager (Tabelle 11). Interessant ist, dass beide Böden von der oberen Hälfte der Lager (NO und SO) im 2004 etwas stabilere Werte anzeigen. Womöglich hat das Bepflanzen der Zwischenlager den oberen Schichten Stabilität gegeben.



### 6.1.5 Fazit

- SO und SU 2003 weisen bei der Vorbelastung und dem Grobporenvolumen Verdichtungsanzeichen auf.
- Der Verdichtungsgrad der Böden sollte jedoch noch keinen Einfluss auf das Pflanzenwachstum haben.
- Die Verdichtungsanzeichen sind 2005 auf der rekultivierten Fläche analytisch nicht mehr nachweisbar, woraus eine Regeneration des einstmals verdichteten Oberbodens ableitbar ist.

## 6.2 Korrelationen mit der Vorbelastung und zeitliche Entwicklung der Parameter

### 6.2.1 Einleitung

Um mögliche Zusammenhänge zwischen der Vorbelastung und den anderen Parametern feststellen zu können, werden diese mit den Vorbelastungswerten korreliert (Tabelle 12). In den folgenden Unterkapiteln werden diese Korrelationen diskutiert.

**Tabelle 12:** Korrelation der Vorbelastung mit den anderen Parametern.

	PH	TON	SCHLUFF	SAND	LAGE- RUNGS- DICHT	EFF. LA- GERUNGS- DICHT
$R^2$	0.562	0.047	0.042	0.036	0.038	0.039
	FEIN- POREN	MITTEL- POREN	FEIN- UND MITTEL- POREN	GROB- POREN	GESAMT- POROSI- TÄT	ORG. SUBSTANZ
$R^2$	0.597	0.349	0.237	0.649	0.236	0.000

### 6.2.2 pH

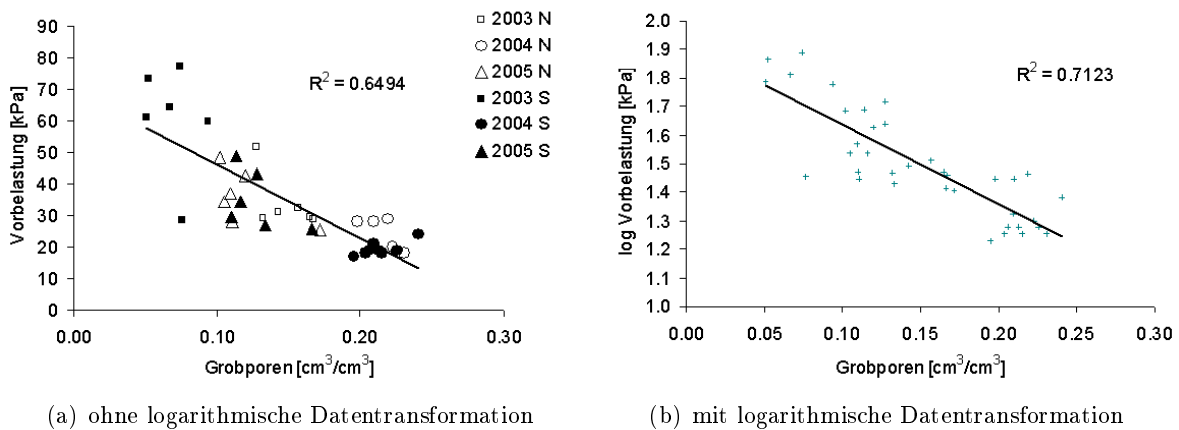
Der pH korreliert mit einem Bestimmtheitsmass von 0.56. Diese Korrelation ist vermutlich zufällig. Einen möglichen Grund dafür wird im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgeführt.

### 6.2.3 Textur

Die Vorbelastung korreliert nur schwach mit Sand, Ton und Schluff, obwohl erwartet werden könnte, dass ein Zusammenhang zwischen tonreichen bzw. tonarmen Böden und der Vorbelastung besteht, denn tonreiche Böden sind verdichtungsanfälliger [QUASEM et al. 2000].

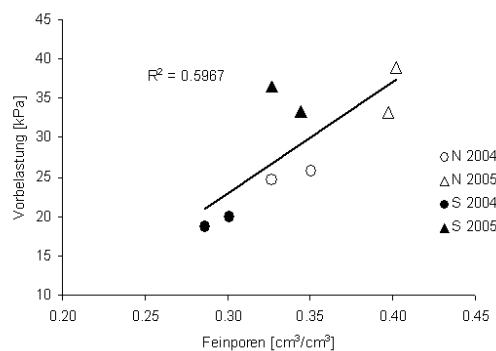
### 6.2.4 Porosität

Vor allem die Feinporen und die Grobporen zeigen einen Zusammenhang mit der Vorbelastung. Hierbei ist allerdings zu bemerken, dass die Feinporen- sowie die Mittelporenabhängigkeit aus Mittelwerten ermittelt wurde, was eine sehr kleine Datenbasis ergibt. Am deutlichsten fällt die Korrelation zwischen Grobporen und der Vorbelastung aus, welche sich auch auf die ganze Datenbasis stützt und nicht nur auf die Mittelwerte. Abbildung 17 (a) zeigt die Abhängigkeit der Vorbelastung vom Grobporenanteil. Dieser Zusammenhang könnte exponentiell sein. Daher wurde in einer zweiten Grafik die Vorbelastung logarithmisch aufgetragen, woraus noch ein grösseres Bestimmtheitsmass resultiert (Abbildung 17 (b)).



**Abbildung 17:** Korrelation zwischen Vorbelastung und Grobporenanteil mit (a) und ohne (b) logarithmische Datentransformation der Vorbelastungswerte.

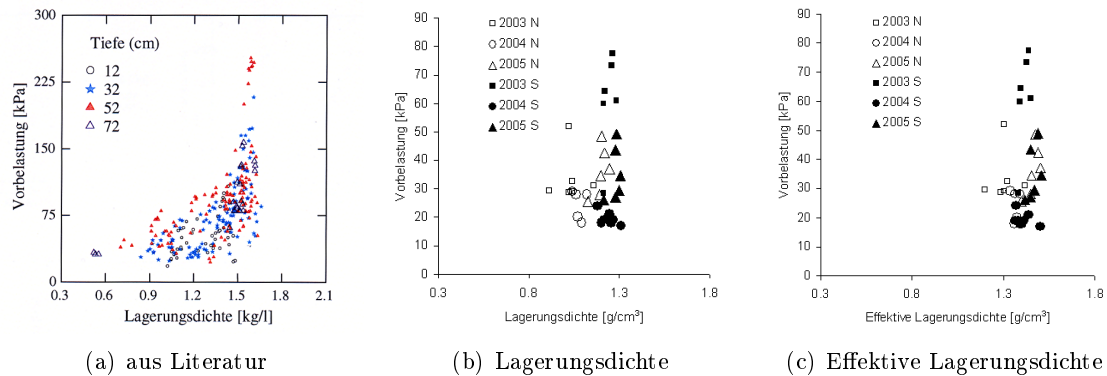
Mit der Gesamtporosität korreliert die Vorbelastung wenig, daher ist diese Korrelation nicht dargestellt. Mittelporen scheinen nicht stark mit der Vorbelastung zusammenzuhängen. Ebenfalls eine schöne Korrelation zeigt die Vorbelastung versus Feinporen auf (Abbildung 18). Trotz der kleinen Datenbasis ist die zunehmende Vorbelastung mit abnehmendem Feinporenanteil deutlich.



**Abbildung 18:** Korrelation zwischen Vorbelastung und Feinporenanteil.

### 6.2.5 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte ist nicht linear von der Vorbelastung abhängig. Es ist ein ähnliches Muster wie bei Quasem [2000] gefunden wurde (Abbildung 19 (a)), nämlich eine exponentielle Abhängigkeit. Dieser Zusammenhang zeigt auf, dass die Vorbelastung mit zunehmender Lagerungsdichte innerhalb 1.4 - 1.5 kg/l zunächst nur schwach, darüber aber sehr stark zunimmt. Aufgrund mangelnder Daten tiefer Lagerungsdichten kann dies bei uns nicht verifiziert werden (Abbildung 19 (b)). Optisch ist jedoch ein solcher Trend feststellbar, es muss jedoch erwähnt werden, dass bei unseren Messungen die Vorbelastungswerte nie eine solche Breite von ca. 20 - 250 kPa erreichen. Auch die Korrelation zwischen effektiver Lagerungsdichte und Vorbelastung zeigt ein ähnliches Bild (Abbildung 19 (c)).



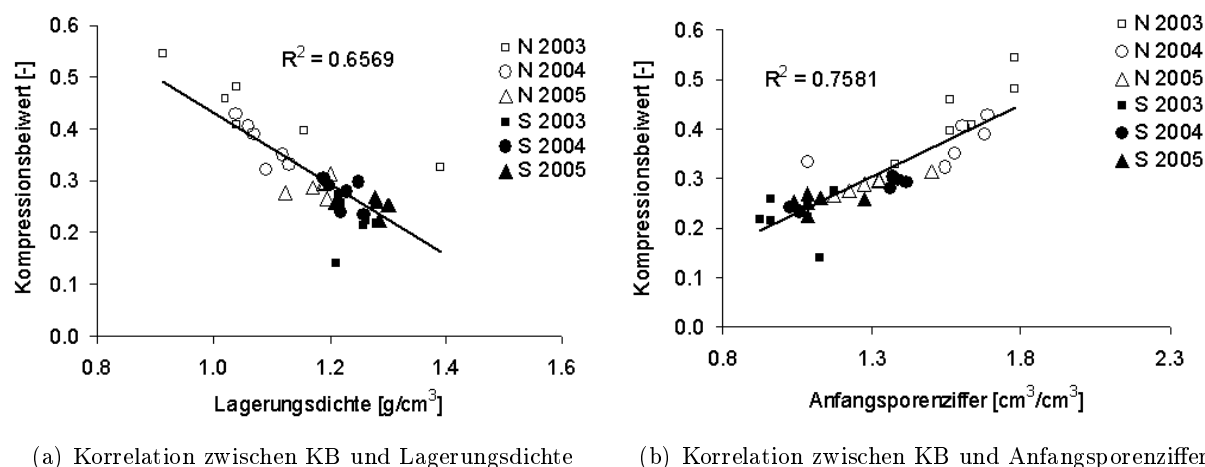
**Abbildung 19:** Korrelationen zwischen Vorbelastung und Lagerungsdichte. (a) Vergleich mit den Resultaten aus [QUASEM et al. 2000], (b) natürliche Lagerungsdichte, (c) effektive Lagerungsdichte.

### 6.2.6 Humusgehalt

Der Humusgehalt korreliert nicht mit der bei uns gemessenen Vorbelastung, obwohl nach Quasem [2000] mit zunehmender organischer Substanz die Vorbelastung tendenziell abnimmt.

## 6.3 Korrelationen mit dem Kompressionsbeiwert

Die Entwicklung des Kompressionsbeiwertes (KB) verläuft entgegengesetzt zur Entwicklung der Lagerungsdichte (Abbildung 20 (a)). Je kleiner der Kompressionsbeiwert ist, desto grösser ist die Lagerungsdichte. Die Korrelation des Kompressionsbeiwertes mit der Lagerungsdichte ergibt ein Bestimmtheitsmass von 0.66. Auch von Kaufmann [2005] wurde diese Beziehung festgestellt. Eine Korrelation mit der Vorbelastung ( $R^2 = 0.0592$ ) ist nicht vorhanden. Ebenfalls korreliert der Kompressionsbeiwert sehr gut mit der Anfangsporenziffer (Abbildung 20 (b)), die ein anderes Mass für das Gesamtporenvolumen darstellt. Dies ist nicht weiter erstaunlich, da die Lagerungsdichte direkt mit der Gesamtporosität zusammenhängt (vgl. 11.4).



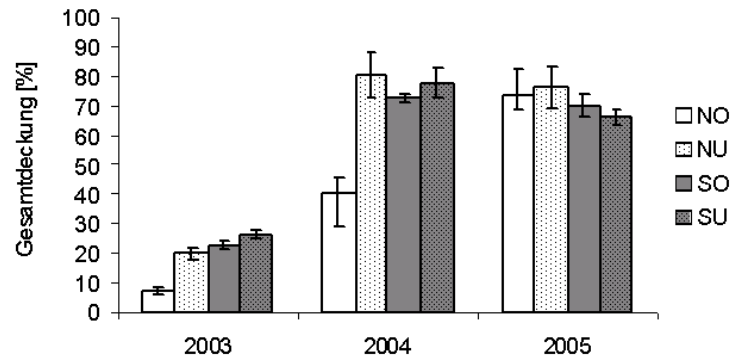
**Abbildung 20:** Der Kompressionsbeiwert korreliert mit der Lagerungsdichte (a) und der Anfangsporenziffer (b).

**Tabelle 13:** Korrelationskoeffizient zwischen Kompressionsbeiwert und den anderen Parametern.

	PH	TON	SCHLUFF	SAND	LAGE- RUNGS- DICHT	EFF. LA- GERUNGS- DICHT
$R^2$	0.012	0.603	0.401	0.502	0.657	0.319
	FEIN- POREN	MITTEL- POREN	FEIN- UND MITTEL- POREN	GROB- POREN	GESAMT- POROSI- TÄT	ORG. SUBSTANZ
$R^2$	0.029	0.153	0.122	0.196	0.795	0.581

Die Korrelation der Grobporen mit dem Kompressionsbeiwert fiel mit einem Bestimmtheitsmass von 0.196 deutlich schlechter aus als mit der Vorbelastung. Korrelationen mit den Mittel- und Feinporen waren nicht gut. Noch kleiner ist das Bestimmtheitsmass des Kompressionsbeiwertes gegenüber pH. Mit der Textur korreliert der Kompressionsbeiwert recht gut. Ton- und schluffreiche Böden weisen einen grösseren, sandreiche Böden einen tieferen Kompressionsbeiwert auf. Mit der effektiven Lagerungsdichte zeigt der Kompressionsbeiwert keine eindeutige Abhängigkeit. Dagegen ist ein enger Zusammenhang zwischen der organischen Substanz und dem Kompressionsbeiwert zu sehen. Die Pflanzenwurzeln stabilisieren den Boden und versorgen ihn mit organischer Substanz. Ein solcher Zusammenhang ist mit einem Bestimmtheitsmass von 0.581 zu erkennen.

## 7 Vegetationsentwicklung



**Abbildung 21:** Zeitliche Entwicklung der Gesamtdeckung der Pflanzenmischung SM Salvia. Die Daten wurden von Lisa Eggenschwiler (FAL Zürich) erhoben.

### 7.1 Messungen

In der Ausgangslage wurde beschrieben, dass parallel zu den Bodenproben ebenfalls bei allen drei Pflanzenmischungen Vegetationsaufnahmen gemacht wurden. Diese Vegetationsdaten wurden von Lisa Eggenschwiler (FAL Zürich) erhoben. In diesem Bericht wird versucht, die Vegetationsdaten in einen Zusammenhang mit den bodenphysikalischen Parametern zu bringen. Auf den im 2004 und 2005 beprobten Streifen wächst die Pflanzenmischung SM Salvia, weshalb vorwiegend diese Saatgutmischung angeschaut wird. In der Abbildung 21 ist zu erkennen, dass im 2003 die Vegetation sehr spärlich wuchs, NO ist deutlich zurückgeblieben, ebenfalls NU wächst etwas schlechter. Im 2004 ist die Vegetation auf NU, SO und SU üppig, NO ist zurückgeblieben. Im 2005 überholen die Pflanzen, die auf dem Boden des Nordlagers wachsen, diejenigen vom Boden des südlichen Lagers. Ende 2004 und anfangs 2005 wurden zusätzlich zur Gesamtdeckung die Biomasse und die Pflanzenhöhe von Kennarten aufgenommen. Die Pflanzen auf dem Nordlagerboden waren deutlich höher und ergaben mehr Biomasse.

### 7.2 Diskussion

#### 2003:

Die Pflanzen sind auf dem Südlagerboden besser gewachsen. Auf der Suche nach der Ursache besteht das Problem, dass 2003 nur die Lager und nicht die rekultivierte Fläche beprobt wurden. Die Daten, die für 2003 vorhandenen sind, sind also nicht von der Fläche, auf der die Vegetationsaufnahmen gemacht wurden. Zur Abschätzung des Zustandes 2003 des Bodens werden im folgenden die Felddaten von 2004 verwendet. Das Südlager hatte eine grössere Lagerungsdichte, weniger Grobporenvolumen und eine höhere Vorbelastung. Falls sich dieses Muster beim Anlegen der Versuchsfläche nicht verändert hat, können die nachfolgenden

Schlüsse auf den Wasserhaushalt gemacht werden. Durch das grössere Grobporenvolumen und die kleinere Lagerungsdichte im Boden des Nordlagers wäre mehr und schneller Wasser abgeflossen, was im extrem trockenen Sommer 2003 ein entscheidender Grund für ein schlechtes Pflanzenwachstum gewesen sein könnte. Doch ebenso gut vorstellbar ist, dass auf der geschütteten Fläche das Grobporenvolumen und die Vorbelastung zwischen Nord- und Südlagerboden sich ausgeglichen hatten und nur noch ein Unterschied in der höheren Lagerungsdichte des Südlagerbodens bestand. Der Südlagerboden scheint aufgrund seines tieferen Tongehalts natürlicherweise eine etwas höhere Lagerungsdichte zu haben. Dieses Verhalten der Vorbelastung, des Grobporenvolumen und der Lagerungsdichte sind in den nachfolgenden Jahren 2004 und 2005 zu sehen. Durch die Schüttung wurde alles gelockert und eine neue Ausgangslage geschaffen. Bodenphysikalisch scheint einzig eine höhere Lagerungsdichte des Südepots für das anfänglich auf dem Südlager bessere Wasserrückhaltevermögen im extrem trockenen Sommer und somit für ein üppigeres Pflanzenwachstum in Frage zu kommen. Möglich ist, dass im Südlagerboden mehr schnellverfügbare Nährstoffe vorhanden waren.

**2004:**

Im 2004 ist der oben im 2003 beschriebene Trend festzustellen: Die Lagerungsdichte ist auf dem Südlagerboden höher, das Grobporenvolumen ist ähnlich, die Vorbelastung hat sich angeglichen und hat abgenommen. Wenn im 2003 schon Proben auf der rekultivierten Fläche genommen worden wären, wären womöglich ähnliche Resultate zu sehen gewesen. Die Lagerungsdichte ist auch hier als Grund für eine unterschiedliche Gesamtdeckung zu vermuten. Für die Deckung im 2004 ist weiter zu erwähnen, dass sie dasselbe Muster wie im 2003 aufweist. In beiden Jahren ist NO zurückgeblieben. Die anfängliche Wurzelbildung (2003) ist wahrscheinlich der Grund für dieses gleiche Muster. Interessant ist, dass die Bedeckung auf allen Flächen zugenommen hat, NO weiterhin zurückgeblieben ist und NU SO und SU überholt hat.

**2005:**

Im 2005 haben sich die Lagerungsdichte, das Grobporenvolumen sowie die Vorbelastung auf den verschiedenen Bodentypen angeglichen. Dies stimmt auch mit dem ähnlichen Gesamtdeckungsgrad der Vegetation auf den verschiedenen Böden überein. Die Unterschiede in der Biomasse sowie der Höhe der Kennarten sind deshalb möglicherweise auf nicht bodenphysikalische Unterschiede zurückzuführen. In Frage kommen unterschiedliche Gehalte der Nährstoffe. Der Deckungsgrad wird vom Phosphat- und Kaliumgehalt gesteuert, die Biomasse durch Nitrat. Der höhere Tongehalt des Nordbodens führt vermutlich zu einer günstigeren Nährstoffspeicher- und Nachliefersituation dieser Böden, da die Kationenaustauschkapazität höher ist. Ein weiteres Indiz für eine günstigere Nährstoffsituation im Nordlagerboden ist, dass die sehr extensive und auf Düngung angewiesene Saatgutmischung SM 420 im 2005 auf dem Südlager eine etwas geringere Deckung aufwies. Da auf der Fläche nicht gedüngt wurde, ist zu folgern, dass der Nährstoffvorrat im Südepotboden schneller aufgebraucht wurde. Ein weiterer Unterschied in den Lagern ist das Gefüge. Der Nordboden hatte ein Krümelgefüge, während im Südlagerboden ein Kitt- oder Kohärentgefüge zu finden ist. Dies war immer

noch in den Proben vom 2005 festzustellen. Die Proben von den Nordbödenstreifen waren grau und krümelig, die von den Südbödenstreifen eher gelblich und verkittet. Dieses Merkmal veränderte sich nicht über die Jahre und kann als mögliche Ursache für das heute gute Wachstum auf den Nordlagerböden gesehen werden. Krümelgefüge schaffen für die Pflanzen bessere Bedingungen.

Bodenphysikalisch hat sich der Boden dank einer Lockerung durch die Schüttung in zwei Jahren regeneriert. Dies ist auch an einer ähnlichen Deckung der Vegetation zu sehen. Die Biomasse und die Höhe der Kennarten zeigen auf den Nordlagerböden ein besseres Pflanzenwachstum. Eine bessere Nährstoffsituation und ein geeigneteres Gefüge in diesen Böden sind mögliche Gründe dafür.

#### **Anaerobie:**

Interessant zu verfolgen ist, dass tendenziell in den ersten 2 Jahren die Böden aus den ursprünglich anaeroben Bedingungen, also NU und SU, gegenüber NO und SO besser anwuchsen. Ein Erklärungsversuch ist, dass in anaeroben Bedingungen Nitrat zu Ammonium reduziert, und Pflanzen Ammonium bevorzugt assimilieren.

### **7.3 Zusammenfassung**

- Die Keimbedingungen waren auf den Südlagerböden günstiger, die langfristigen Ertragsbedingungen scheinen auf den Nordlagerböden besser zu sein.
- Für die besseren Keimbedingungen auf dem Südlagerdepot kann bodenphysikalisch in Zusammenhang mit einem günstigeren Wasserrückhaltevermögen die höhere Lagerungsdichte eine Rolle gespielt haben.
- Mehr schnell verfügbare Nährstoffe im Südlagerdepot könnten die anfängliche höhere Deckung erklären.
- Langfristig ist der Nordlagerboden fruchtbarer, womöglich wegen eines besseren Nährstoffreservoirs, einer höheren Kationenaustauschkapazität des höheren Tongehalts und eines günstigeren Gefüges.
- Böden der anaeroben Schichten lieferten eher bessere Anfangsbedingungen für die Aussaat.
- Die bodenphysikalischen Bedingungen haben sich angeglichen, es kann von einer Lockerung durch die Schüttung gesprochen werden. Das Pflanzenwachstum sollte auf diesen Böden nicht mehr von bodenphysikalischen Grössen abhängen. Der Gesamtdeckungsgrad zeigt eine demensprechende Angleichung des Pflanzenwachstums.
- Unklar bleibt, ob das Nordlager bereits vor dem Anlegen des Lagers schon ein günstigeres und das Südlager ein schlechteres Gefüge hatte, oder ob die bodenfachgerechte Behandlung dieses Gefüge im Nordlagerboden erhalten hat und die Verdichtung im Süden zu einem verkitteten ungeeigneten Gefüge führte.

## 8 Schlussfolgerungen

Lager: Die bodenphysikalischen Messresultate deuten auf eine leichte Verdichtung im südlichen Zwischenlager hin. So wurde in diesem Lager höhere Vorbelastungen, ein tieferes Grobporenvolumen und grössere Lagerungsdichten gemessen. Alle Werte dieser Parameter jedoch liegen unterhalb von vorgeschlagenen Richtwerten [BGS 2004], so dass nur von einer mässigen Verdichtung gesprochen werden kann.

Bodenentwicklung: Die in den Lagern vorhandenen Unterschiede der Parameterwerte sind zwei Jahre später auf der Rekultivierungsfläche bodenphysikalisch nicht mehr nachweisbar. Der ursprünglich verdichtete und damit beeinträchtigte Boden des südlichen Zwischenlagers scheint sich erholt zu haben.

Vegetation: Das Pflanzenwachstum weist zwischen den zwei Böden nach zwei Jahren immer noch Unterschiede auf. Diese Differenzen können mit den erfassten bodenphysikalischen Parametern nicht erklärt werden.

Aufgrund dieses Versuches und dem Befund, dass sich verdichteter Boden auf der geschützten Rekultivierungsfläche innerhalb von zwei Jahren bodenphysikalisch erholen konnte, können Rückschlüsse auf die Praxis gezogen werden. Angesprochen soll die Schütthöhe von Oberbodenzwischenlager werden, die erhöht werden könnte. Diese Aussage gilt jedoch nur für Böden ähnlicher Bodenarten bei vergleichbarem Klima, Verdichtungsgrad und Vegetation. Allgemein müsste für die Schütthöhe die Bodenart mitberücksichtigt werden, denn tonreiche Böden dürften nicht so hoch ausgelegt werden. Auch die Art und Weise des Einbauens des Oberbodens müsste berücksichtigt werden, wobei u. a. die Saugspannung zu prüfen ist und ob das Zwischenlager im Winter bestehen bleibt. Ein weiterer Aspekt wäre die Anpassung der Saatmischung an die Bodenart.

## 9 Ausblick

Da der Zusammenhang zwischen bodenphysikalischen Messungen und Vegetationsaufnahmen nicht immer vorhanden ist, wäre es sinnvoll, den Boden auf weitere Eigenschaften zu untersuchen. Von Interesse wäre die Konzentration und Verfügbarkeit von Nährstoffen (v.a. Stickstoff, Phosphor und Kalium) und bodenbiologische Kennwerte. Weiter wäre es interessant, stark verdichtetes Bodenmaterial und dessen Regeneration zu untersuchen, wie auch anaeroben Boden und dessen Auswirkung unabhängig von einer Verdichtung. Schliesslich möchten wir den gleichen Versuch mit Unterbodenmaterial vorschlagen, da sich Unterboden bekanntlich schlechter von Verdichtungen erholen kann.



## 10 Literaturverzeichnis

### Literatur

- [BERLI et al. 1999] BERLI, M., B. KULLI, W. ATTINGER, M. KELLER, J. LEUENBERGER, H. FLÜHLER und R. SCHULIN (1999). *Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit des Unterbodens bei Verlegen unterirdischer Rohrleitungen durch Kulturland*. Institut für terrestrische Ökologie, ETH Zürich.
- [BEW 1997] BEW (1997). *Revidierte Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen*. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), Bern, 8 Seiten und Anhang.
- [BGS 1979] BGS (1979). *BGS-Bulletin, Nr.3*.
- [BGS 2004] BGS (2004). *Definitionen und Erfassung von Bodenschadverdichtungen*. BGS Dokument 13 (Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz). Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz.
- [BLAKE und HARTGE 1986] BLAKE, G. R. und K. H. HARTGE (1986). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Klute, A. (Ed.), 2nd edition. Soc. Agr., Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, Seiten 363-375.
- [BONETTI et al. 2004] BONETTI, C., P. RAUBER, A. SPARACINO und U. SUTER (2004). *Umgang mit ausgehobenem Boden auf Grossbaustellen*. Semesterarbeit am Departement D-BAUG an der ETH Zürich.
- [BUWAL 2001] BUWAL (2001). *Bodenschutz beim Bauen*. Leitfaden Umwelt Nr.10, 83 Seiten.
- [CASAGRANDE 1936] CASAGRANDE, A. (1936). *The determination of pre-consolidation load and its practical significance*. Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 22 to 26 July 1936, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, S. Seiten 60–64.
- [DVWK 1995] DVWK (1995). *Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil 1: Mechanische Belastbarkeit*. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V (DVWK), Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 243/1995, 12 Seiten.
- [FAL 1997] FAL, IUL, RAC FAW (1997). *Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL, IUL, RAC und FAW), Zürich-Reckenholz*.
- [FLÜHLER und ROTH 2002] FLÜHLER, H. und K. ROTH (2002). *Physik der ungesättigten Zone*. Vorlesungsskript, ETH Zürich und Universität Heidelberg.

- [HARTGE und HORN 1992] HARTGE, K. H. und R. HORN (1992). *Die physikalische Untersuchung von Böden*. 3.Auflage. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- [KAUFMANN 2005] KAUFMANN, M., S. TOBIAS und R. SCHULIN (2005). *Development of the mechanical stability of a restored soil during the first three years of re-cultivation*. Institute for Spacial and Landscape Planning, ETH Zurich.
- [LANG et al. 2002] LANG, H. J., J. HUDER und P. AMANN (2002). *Bodenmechanik und Grundbau*. Springer Verlag, Berlin.
- [QUASEM et al. 2000] QUASEM, H., W. ATTINGER, M. BERLI und R. SCHULIN (2000). *Schlussbericht zum Forschungsprojekt. Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden*. Institut für Terrestrische Ökologie der ETH Zürich.
- [SCHEFFER und SCHACHSCHABEL 1998] SCHEFFER, F. und P. SCHACHSCHABEL (1998). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke, Stuttgart, 445 Seiten.
- [SCHULIN 2000] SCHULIN, R. (2000). *Bodenschutz Grundzüge*. Vorlesungsunterlagen, D-BAUG, ETH Zürich.
- [SOIL SURVEY STAFF 1997] SOIL SURVEY STAFF (1997). *Keys to Soil Taxonomy*. Pocahontas Press, Inc..Blackburg, Virginia, USA, 545 Seiten.
- [VBBo 1998] VBBo (1998). *Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) des Schweizerischen Bundesrates vom 1. Juli 1998*. Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern. SR Nr. 814.12.

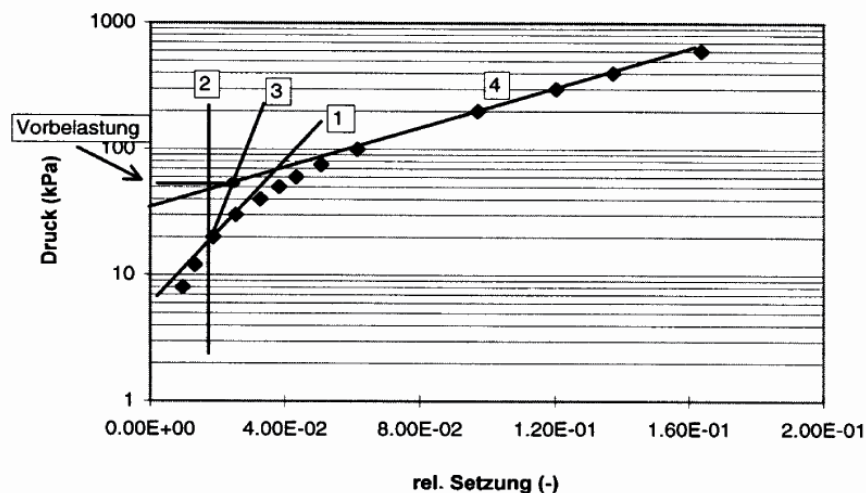
## 11 Anhang

### 11.1 Schwermetallanalyse

Die Proben wurden von uns bei 105°C getrocknet und auf 2 mm gesiebt. Die Schwermetallanalyse wurde durch Niutec in Winterthur durchgeführt. Gemessen wurde der Totalgehalt nach VBBo mittels Extraktion mit heisser Salpetersäure. Die Quantifizierung der Schwermetalle erfolgte mit Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) [FAL 1997].

### 11.2 Ödometerversuch - Verfahren nach Casagrande

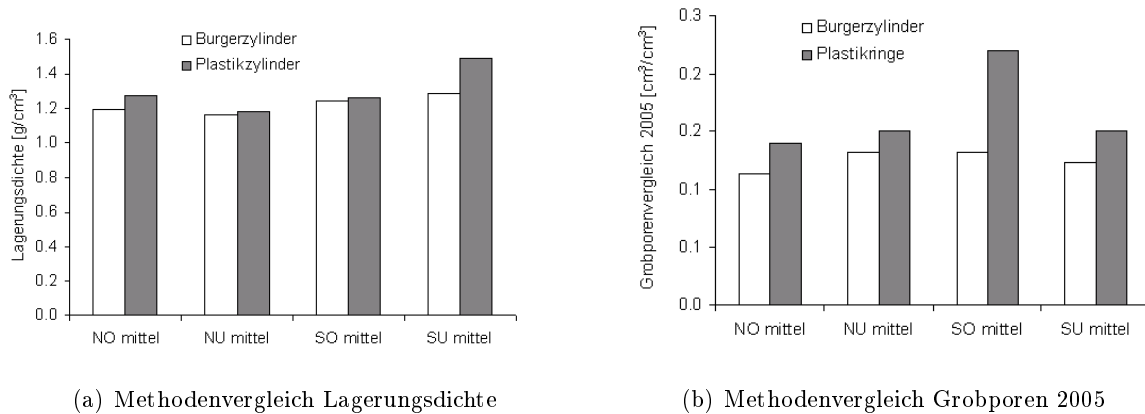
Da diese Messung für unsere Arbeit wichtig ist, soll das Verfahren zur Bestimmung der Vorbelastung ausführlich beschrieben werden.



**Abbildung 22:** Auswertung der Drucksetzungscurve nach dem Verfahren von Casagrande [1936].

1. Von Auge Punkt bestimmen, wo die Kurve die grösste Krümmung aufweist; Tangente zur Kurve durch Punkt legen.
2. Parallele zur y-Achse durch den Kurvenpunkt legen.
3. Winkelhalbierende zwischen der Tangente und der Parallelen konstruieren.
4. Erstverdichtungsgeraden einpassen. Schnittpunkt dieser Geraden und der Winkelhalbierenden ergibt den Wert der Vorbelastung.

### 11.3 Methodenvergleich



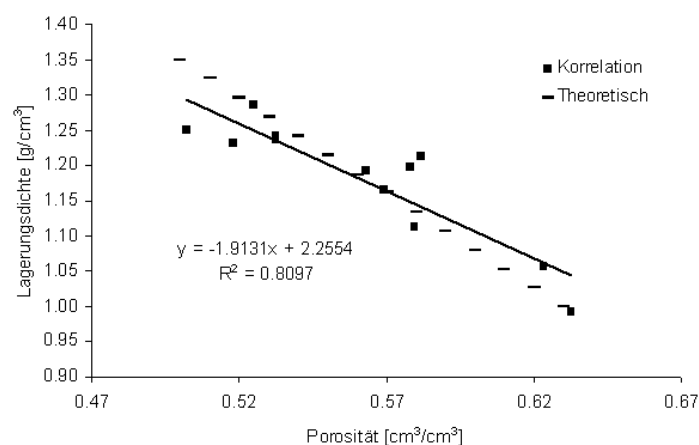
**Abbildung 23:** Lagerungsdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] gemessen mit zwei verschiedenen Methoden, den Burgerzylindern (linke Säulen) und den Plastikzylindern (rechte Säulen).

Die zwei Zylindergrößen ergeben für die Messung der Lagerungsdichte ähnliche Werte (Abbildung 23 (a)). Die Heterogenität des Bodens spielt für Wertschwankungen eine Rolle. Daneben sind analytische Einflüsse zu erkennen. Die mit den Plastikzylindern gemessenen Lagerungsdichten ergeben stets höhere Werte. Der Vergleich zu den Grobporen (Abbildung 23 (b)) zeigt, dass der Desorptionsversuch der Burgerzylinder zu kleineren Werten führt.

### 11.4 Porosität vs. Lagerungsdichte

Unsere Daten zeigen den von Theorie her bekannten Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Porosität (Abbildung 24). Die theoretische Formel dazu ist:

$$n = 1 - \text{Lagerungsdichte} / \text{reelle Dichte (mit reeller Dichte} = 2.65 \text{ g}/\text{cm}^3)$$



**Abbildung 24:** Porosität gegen die Lagerungsdichte

## 11.5 Daten

**Tabelle 14: Textur und organische Substanz in Massen-%.**

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
Sand	37	32	51	53	32	22	59	50	33	29	47	54
Schluff	34	37	30	28	39	44	25	31	38	40	30	27
Ton	29	32	20	19	30	34	16	21	29	30	23	19
Org. Substanz	5.1	5.3	4.8	3.9	4.9	5.4	3.6	4.5	3.8	3.9	3.2	3.3

**Tabelle 15: pH-Wert.** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	7.21	7.26	7.36	7.29	6.83	6.83	6.64	6.80	7.12	7.06	7.36	7.26
II	7.21	7.27	7.35	7.28	6.80	6.83	6.62	6.81	7.12	7.04	7.35	7.27
III	7.20	7.25	7.35	7.26	6.79	6.83	6.60	6.82	7.13	7.07	7.33	7.28
MW	7.21	7.26	7.35	7.28	6.81	6.83	6.62	6.81	7.12	7.06	7.35	7.27
STW	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01

**Tabelle 16: Schwermetallgehalte in [mg/kg<sub>TS</sub>].**

	NO	NU	SO	SU
Blei	35	31	33	33
Cadmium	0.42	0.45	0.30	0.24
Kupfer	20	20	13	10
Zink	54	54	33	31

**Tabelle 17: Lagerungsdichte Burgerzylinder in  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	1.39	1.02	1.26	1.28	1.13	1.06	1.22	1.25	1.19	1.17	1.21	1.28
II	1.16	0.91	1.22	1.26	1.12	1.04	1.26	1.20	1.19	1.20	1.29	1.30
III	1.04	1.04	1.22	1.21	1.09	1.07	1.23	1.19	1.20	1.12	1.30	1.28
MW	1.20	0.99	1.23	1.25	1.11	1.06	1.24	1.21	1.19	1.16	1.24	1.29
STW	0.18	0.07	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	0.04	0.05	0.01

**Tabelle 18: Lagerungsdichte Plastikzylinder in  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	-	-	-	-	1.10	0.93	1.12	1.11	1.19	1.18	1.29	1.59
II	-	-	-	-	1.15	1.09	1.31	1.12	1.32	1.18	1.21	1.52
III	-	-	-	-	1.15	0.92	1.18	1.20	1.32	1.18	1.29	1.37
MW	-	-	-	-	1.13	0.98	1.20	1.14	1.28	1.18	1.27	1.49
STW	-	-	-	-	0.03	0.10	0.10	0.05	0.08	0.00	0.05	0.12

**Tabelle 19: effektive Lagerungsdichte gemessen mit Burgerzylindern in  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	1.66	1.30	1.44	1.45	1.39	1.36	1.36	1.44	1.45	1.44	1.42	1.45
II	1.42	1.20	1.40	1.43	1.39	1.34	1.41	1.39	1.45	1.47	1.49	1.47
III	1.30	1.32	1.39	1.38	1.36	1.38	1.38	1.38	1.45	1.40	1.51	1.45
MW	1.46	1.27	1.41	1.42	1.38	1.36	1.38	1.40	1.45	1.44	1.47	1.46
STW	0.18	0.07	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.00	0.04	0.05	0.01

**Tabelle 20: effektive Lagerungsdichte gemessen mit Plastikzylindern in  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	-	-	-	-	1.37	1.24	1.26	1.30	1.45	1.45	1.50	1.76
II	-	-	-	-	1.41	1.40	1.46	1.31	1.57	1.45	1.42	1.69
III	-	-	-	-	1.41	1.22	1.32	1.39	1.58	1.46	1.50	1.54
MW	-	-	-	-	1.40	1.28	1.35	1.34	1.53	1.45	1.47	1.66
STW	-	-	-	-	0.03	0.10	0.10	0.05	0.08	0.00	0.05	0.12

**Tabelle 21: Gesamtporenvolumen gemessen mit Burgerzylindern in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	0.50	0.61	0.52	0.48	0.52	0.62	0.51	0.58	0.58	0.57	0.56	0.52
II	0.58	0.64	0.49	0.49	0.61	0.63	0.51	0.59	0.57	0.56	0.52	0.52
III	0.61	0.64	0.54	0.53	0.61	0.63	0.58	0.58	0.57	0.60	0.51	0.53
MW	0.56	0.63	0.52	0.50	0.58	0.62	0.53	0.58	0.57	0.58	0.53	0.52
STW	0.06	0.02	0.03	0.02	0.05	0.01	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01

**Tabelle 22: Gesamtporenvolumen gemessen mit Plastikzylindern in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	-	-	-	-	0.62	0.63	0.63	0.62	0.62	0.59	0.62	0.52
II	-	-	-	-	0.62	0.59	0.55	0.60	0.61	0.64	0.61	0.55
III	-	-	-	-	0.60	0.72	0.61	0.63	0.59	0.63	0.71	0.62
MW	-	-	-	-	0.61	0.65	0.59	0.62	0.61	0.62	0.64	0.56
STW	-	-	-	-	0.01	0.07	0.04	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05

**Tabelle 23: Grobporenvolumen gemessen mit Burgerzylindern in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	0.14	0.13	0.07	0.05	0.16	0.19	0.19	0.20	0.11	0.12	0.17	0.13
II	0.13	0.16	0.07	0.05	0.20	0.22	0.20	0.21	0.11	0.10	0.11	0.11
III	0.17	0.16	0.09	0.08	0.23	0.22	0.22	0.19	0.11	0.17	0.12	0.13
MW	0.15	0.15	0.08	0.06	0.20	0.21	0.20	0.20	0.11	0.13	0.13	0.12
STW	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.04	0.03	0.01

**Tabelle 24: Grobporenvolumen gemessen mit Plastikzylindern in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	-	-	-	-	0.22	0.24	0.24	0.19	0.18	0.13	0.17	0.11
II	-	-	-	-	0.21	0.14	0.14	0.22	0.12	0.17	0.19	0.14
III	-	-	-	-	0.18	0.28	0.22	0.25	0.11	0.16	0.30	0.20
MW	-	-	-	-	0.21	0.22	0.20	0.22	0.14	0.15	0.22	0.15
STW	-	-	-	-	0.02	0.07	0.05	0.03	0.04	0.02	0.07	0.05

**Tabelle 25: Mittelporenvolumen gemessen mit Plastikzylindern in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	-	-	-	-	0.08	0.07	0.12	0.10	0.07	0.05	0.10	0.06
II	-	-	-	-	0.08	0.07	0.10	0.09	0.08	0.08	0.10	0.07
III	-	-	-	-	0.07	0.08	0.10	0.09	0.07	0.07	0.10	0.08
MW	-	-	-	-	0.08	0.07	0.11	0.09	0.07	0.06	0.10	0.07
STW	-	-	-	-	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01

**Tabelle 26: Fein- und Mittelporenvolumen gemessen mit Burgerzylindern in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	0.43	0.48	0.45	0.43	0.32	0.42	0.32	0.38	0.46	0.43	0.39	0.40
II	0.49	0.48	0.42	0.44	0.38	0.41	0.31	0.38	0.44	0.46	0.41	0.41
III	0.44	0.49	0.45	0.45	0.38	0.41	0.35	0.39	0.46	0.43	0.40	0.40
MW	0.46	0.48	0.44	0.44	0.36	0.42	0.33	0.38	0.45	0.44	0.40	0.40
STW	0.03	0.00	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01

**Tabelle 27: Feinporenvolumen gemessen mit Plastikzylindern in  $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	-	-	-	-	0.32	0.31	0.27	0.34	0.37	0.41	0.35	0.36
II	-	-	-	-	0.32	0.38	0.31	0.29	0.41	0.40	0.32	0.34
III	-	-	-	-	0.34	0.35	0.28	0.28	0.41	0.40	0.31	0.34
MW	-	-	-	-	0.33	0.35	0.29	0.30	0.40	0.40	0.33	0.34
STW	-	-	-	-	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01

**Tabelle 28: Vorbelastung in  $[\text{kPa}]$ .** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	31	52	78	61	28	28	19	21	28	42	26	43
II	29	30	65	74	18	29	19	18	34	48	49	29
III	29	33	60	29	-	20	18	24	37	25	34	27
MW	30	38	67	54	23	26	19	21	33	39	36	33
STW	1.2	12.2	9.1	23.2	7.1	4.9	0.6	3.0	4.6	11.9	11.6	8.9



**Tabelle 29: Kompressionsbeiwert [ - ].** I, II, III: Einzelmessungen, MW: Mittelwert, STW: Standardabweichung.

	2003				2004				2005			
	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU	NO	NU	SO	SU
I	0.33	0.46	0.22	0.22	0.33	0.40	0.24	0.30	0.30	0.29	0.26	0.27
II	0.40	0.54	0.26	0.21	0.35	0.43	0.23	0.29	0.29	0.31	0.22	0.25
III	0.41	0.48	0.27	0.14	-	0.39	0.28	0.30	0.27	0.28	0.25	0.26
MW	0.38	0.49	0.25	0.19	0.34	0.41	0.25	0.30	0.29	0.29	0.24	0.26
STW	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01